

980068



Tielaitos

MPR
27.2.91

Suolauksen vaikutukset tienvarsikasvillisuuteen



Tielaitoksen
selvityksiä

4/1991

Kuopio 1991

Kuopion
tuotantotekninen
kehitysyksikkö

08 TIEL

Tielaitoksen selvityksiä
4/1991

Suolauksen vaikutukset tienvarsikasvillisuuteen



Tielaitos
Kuopion tuotantotekninen
kehitysyksikkö

Kuopio 1991

ISBN 951-47-4098-x
ISSN 0788-3722
TIEL 3200004
Valtion painatuskeskus
Helsinki 1991

Julkaisua myy
Tiehallitus, lomakevarasto

Tielaitos
Tiehallitus
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 1541

**Kuopion tuotantotekninen
kehitysyksikkö**
PL 1117
70101 KUOPIO
Puh. vaihde (971) 199 111

TIIVISTELMÄ

Tässä tutkimuksessa selvitettiin tiesuolan vaikutuksia tienvarren kasvillisuuteen kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisen tutkimuksen avulla. Kokeellisessa osassa tutkittiin sekä liukkaudentorjunta- että pölynsidontasuolauksen vaikutuksia tienvarren mäntyihin.

Talviaikainen liukkaudentorjuntasuolaus nosti selvästi tienvarrella kasvavien mäntyjen neulasten natrium- ja kloridipitoisuuksia kontrollialoihin verrattuna. Neulasten kalsiumpitoisuuksiin talvisuolauksella ei ollut vaikutusta. Teiden varsilla havaittiin myös tiesuolalle tyypillisiä näkyviä oireita kuten neulasten ruskistumista, joskin oireet ilmeisesti leudon kevättalven johdosta olivat vähäiset. Kauempana tiestä (15-20 m) neulasten natrium- ja kloridipitoisuudet laskivat suolattujen teiden varsilla lähes kontrollialojen tasolle.

Neulasten kalvovaurioita kuvastava kaliumvuodon määrä kohosi merkitsevästi ainoastaan helmikuun mittauksissa. Johtokykymitauksella, joka myös kertoo mm. kalvovaurioiden määrän, ei eroja suolattujen ja suolaamattomien teiden välille saatu.

Kesäaikaisella pölynsidontasuolauksella ei ollut merkitseviä vaikutuksia sorateiden varrella kasvaviin mäntyihin. Neulasten kloridipitoisuuksissa havaittiin kuitenkin lievää nousua.

ESIPUHE

Ympäristönsuojelu on tielaitoksen tutkimus- ja kehittämistoiminnan painopistealueita. Yhtenä merkittävänä tutkimuskohteena ovat tiesuolan vaikutukset ympäristöön.

Tässä tutkimuksessa käsitellään tiesuolan vaikutusta tienvarren kasvillisuuteen, erityisesti mäntyihin. Tutkimus on tehty Kuopion yliopiston ekologisen ympäristöhygienian laitoksella. Työn ovat tehneet luonnontieteiden kandidaatti Eeva-Liisa Hautala, filosofian tohtori Jari Oksanen ja vs. yliassistentti Anu Wulff. Tielaitoksen puolesta työtä on ohjannut diplomi-insinööri Unto Miettinen.

Kuopiossa tammikuussa 1991

Tielaitoksen Kuopion tuotantotekninen kehitysyksikkö

SISÄLLYS

Tiivistelmä	3
Esipuhe	5
Sisäilyys	7
 <u>1 JOHDANTO</u>	 9
1.1 Yleistä	9
1.2 Natriumkloridi (NaCl) ja kalsiumkloridi (CaCl ₂) teiden suolauksessa	9
 <u>2 KIRJALLISUUSKATSAUS</u>	 10
2.1 Yleistä suolan vaikutuksista kasvillisuudessa	10
2.1.1 Suolan (NaCl ja CaCl ₂) kulkeutuminen kasveihin	11
2.1.2 Eri kasvien herkkyys suolalle	12
2.1.2.1 Lehtipuut	12
2.1.2.2 Havupuut	13
2.1.2.3 Pensaat	14
2.1.2.4 Ruoho- ja palkokasvit	14
2.1.3 Natriumin, kloridin ja kalsiumin merkitys kasveille	15
2.3 Suolan aiheuttamat ulkoiset oireet kasvillisuudessa	18
2.4 Suolan aiheuttamat hienorakenteen muutokset kasveissa .	19
2.5 Suolan vaikutukset kasvuun	20
2.6 Suolan vaikutukset hyötykasveilla	21
2.7 Muut vaikutukset	21
2.8 Suolan aiheuttamiin kasvillisuusvaurioihin vaikuttavia tekijöitä	23
2.8.1 Ympäristötekijät	23
2.8.2 Kasvien perinnöllisten ominaisuuksien vaikutukset suolansietoon	24
2.9 Muita puiden vaurioitumiseen vaikuttavia tekijöitä	25
2.10 Esimerkkitutkimuksia	25
2.11 Suola maaperässä	26
2.12 Maaperän suolapitoisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ...	27

3 AINEISTO JA MENETELMÄT	30
3.1 Liukkaudentorjuntasuolaus (talvisuolaus)	30
3.1.1 Koealojen kuvaus	30
3.1.2 Käytetyt menetelmät	33
3.1.3 Kaliumionivuodon mitta	34
3.1.4 Johtokykymittaus (konduktiviteettimittaus)	35
3.1.5 Natrium, kalsium ja kloridipitoisuuksien määritys	35
3.1.6 Ulkoisten oireiden kuvaus	36
3.2 Pölynsidontasuolaus (kesäsuolaus)	36
3.2.1 Koealojen kuvaus	36
3.2.2 Käytetyt menetelmät	37
3.3 Tulosten tilastollinen käsittely	39
4 TULOKSET	40
4.1 Talvisuolaus: eri koealojen välinen vertailu	40
4.1.1 Kaliumionivuoto	40
4.1.2 Johtokyky	40
4.1.3 Natriumpitoisuus	42
4.1.4 Kalsiumpitoisuus	43
4.1.5 Kloridipitoisuus	44
4.1.6 Ulkoiset oireet	45
4.2 Talvisuolaus: etäisyyden vaikutus	48
4.2.1 Kaliumionivuoto	48
4.2.2 Johtokykymittaus	50
4.2.3 Natriumpitoisuus	50
4.2.4 Kloridipitoisuus	52
4.3 Kesäsuolaus	52
4.3.1 Kaliumionivuoto ja johtokykymittaus	52
4.3.2 Kalsium- ja kloridipitoisuus	54
4.3.3 Ulkoiset oireet	54
5 TULOSTEN TARKASTELU	57
6 YHTEENVETO	61
LÄHTEET	63

1 JOHDANTO

1.1 Yleistä

Teiden varsilla puut ovat paikoin sangen huonokuntoisia ja mm. tiesuolan otaksutaan olevan osallisena vaurioiden kehittymiseen. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää maantiesuolan vaikutuksia kasvillisuuteen sekä kirjallisuuden että kokeellisen tutkimuksen avulla. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli koota kansainvälinen tieto maantiesuolana käytettyjen yhdisteiden kulkeutumistavoista, kerääntymisestä ja vaikutuksista eri kasveihin.

Tutkimuksen kokeellisessa osassa selvitettiin sekä talvella tehtävän liukkaudentorjuntasuolauksen (natriumkloridi, NaCl ja kalsiumkloridi, CaCl₂) että kesällä tehtävän pölynsidontasuolauksen (CaCl₂) vaikutuksia mäntyyn (Pinus sylvestris): nousevatko suolapitoisuudet puiden neulasissa, aiheuttaako suola solukalvojen vaurioita neulasissa, millaisia näkyviä oireita mahdollisesti esiintyy ja miten etäisyys tien reunasta vaikuttaa suolapitoisuuksiin neulasissa.

1.2 Natriumkloridi (NaCl) ja kalsiumkloridi (CaCl₂) teiden suolauksessa

Kalsiumkloridin vesiliuoksen jäätymispiste on alhaisempi kuin natriumkloridin vesiliuoksen, joten alle nollan asteen lämpötiloissa kalsiumkloridi on liukoisempi kuin natriumkloridi. Kalsiumkloridi on myös erittäin hygroskooppinen (kosteutta imevä), jolloin liukenemisprosessi jäähän alkaa helpommin myös silloin kun suolaa levitetään kuivana. Näistä syistä aiheutuen kalsiumkloridi on natriumkloridia tehokkaampi jään sulattaja ja se toimii alhaisemmissa lämpötiloissa kuin natriumkloridi. Kiinteätä natriumkloridia voi käyttää käytännössä noin - 8°C:een saakka kun taas kalsiumkloridi toimii - 15-20°C:een saakka.

Toisaalta natriumkloridin sulatuskyky säilyy kauemmin kuin kalsiumkloridin (Road transport research, 1989).

Sulatustehokkuus ja taloudelliset tekijät huomioonottaen edullisinta lieneekin käyttää kalsiumkloridin ja natriumkloridin sekoitusta (Road transport research, 1989). Lisäksi natriumkloridin ja kalsiumkloridin sekoituksen käytöllä saattaa olla jopa suolan kertymistä ehkäisevä vaikutus kasvillisuuteen verrattuna pelkkään natriumkloridin käyttöön (Bogemans ym. 1989).

Natriumkloridin on todettu olevan myrkyllisin käytetyistä suolautavoista. Kalsiumkloridi on vähemmän myrkyllinen kuin natriumkloridi ja vähemmän käytetyt kaliumkloridi ja magnesiumkloridi edelleen vähemmän myrkyllisiä (Roberts ja Zybura 1967, Rich 1972). Lisäksi kalsium-, kalium- ja magnesiumkloridi ovat kalliimpia kuin natriumkloridi ja myös erittäin hygroskooppisia, joten niiden varastoiminen on vaikeaa (Road transport research 1989). Myös kalsiummagnesiumasetaatin käyttöä natriumkloridin sijasta on Suomessa tutkittu pohjavedenottoalueilla (kirjallinen tiedonanto, Tielaitos, Kuopion tiepiiri 1990).

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Yleistä suolan vaikutuksista kasvillisuudessa

Pieni määrä suolaa (NaCl) voi olla kasveille eduksi, sillä se sulkee ilmaraot, jolloin kasvi pidättää kosteutta paremmin lämpimällä ja kuivalla säällä. Liika suolamäärä saa kuitenkin aikaan sen, että kasvi ei pysty enää kontrolloimaan vesitalouttaan vaan haihduttaa koko ajan vettä ja lopulta kuihtuu (Road transport research 1989). Lukuisissa tutkimuksissa on osoitettu sekä ilman että maan kautta tulevan suola-altistuksen lisäävän kasvien natrium- ja kloridipitoisuuksia ja aiheuttavan erilaisia ulkoisia oireita. Suolan aiheuttamia vaikutuksia on tutkittu sekä lehti- että havupuilla ja erilaisilla ruohoilla ja viljelykasveilla.

2.1.1 Suolan (NaCl ja CaCl_2) kulkeutuminen kasveihin

Kasvit ottavat suolaa maasta juurien kautta kasvukauden aikana ja se varastoituu kasvien lehtiin ja varteen. Useissa tutkimuksissa on todettu, että myös maahan joutunut suola kohottaa kasvien natrium- ja kloridipitoisuuksia (Zulauf 1966, Hofstra ja Smith 1984, Herrick 1988). Suola kulkeutuu kasveihin ilman kautta suolaroiskeiden tai -pölyn mukana. Ilman kautta tuleva suola laskeutuu kasvin lehdelle ja absorboituu sisälle. Bucovack ja Wittwer (1957) totesivat tutkimuksissaan, että kaikkia mineraaleja absorboituu kasveihin ilman kautta tulevana laskeumana, absorboitumisnopeus vain vaihtelee. Esimerkiksi natrium absorboituu nopeasti ja on erittäin liikkuva ioni kasvin sisällä.

Tutkimuksissa on osoitettu, että ilman kautta tuleva laskeuma on kasvien suolan saannin kannalta merkittävämpi suolan lähde kuin maaperästä juurien kautta tuleva suola (Hofstra ja Hall 1971, Constantini ja Rich 1973, Simini ja Leone 1986). Maan suolapitoisuuden on raportoitu laskevan taustatasolle noin 30 metrin päässä tiestä (Hofstra ja Hall 1971, Rich 1972, Liem ym. 1984, Fleck 1987) kun kohonneita kasvimateriaalin natrium- ja kloridipitoisuuksia ja suolan aiheuttamia näkyviä oireita oli jopa 120 metrin päässä tiestä (Hofstra ja Hall 1971). Behm ja Kessler (1971) havaitsivat kasvillisuusvaurioita moottoritien varrella jopa 200 metrin etäisyydellä tiestä. Lisäksi suolan aiheuttamia oireita ja kohonneita suolapitoisuuksia on havaittu enemmän teiden eteläpuolella, tuulen alapuolella olevissa puissa sekä saman puun tien puoleisissa oksissa lumirajan yläpuolella ja roiskekorkeuden alapuolella (Sauer 1967, Hofstra ja Hall 1971, Smith 1970, Constantini ja Rich 1973, Lumis ym. 1973, Pyykkö 1977, Liem ym. 1984, Northover 1987). Muilla alkuaaineilla (kalium, typpi, fosfori) ei vastaavia eroja ole ollut (Hall ym. 1973). Suolaroiskeiden aiheuttama kasvin suolapitoisuuden kohoaminen vaikuttaa tavallisesti vain altistuneeseen kasvinosaan, ei koko kasviin, kun taas juurien kautta tuleva suola vaikuttaa koko kasviin (Priebe 1990).

Esimerkiksi suolaisen veden valunnalle altistuneet kasvit suolatun tien lähistöllä on todettu huonokuntoisemmiksi kuin altistumattomat (Hofstra ja Smith 1984). Suolapitoisuuksien on todettu nousevan vielä suolauksen lopettamisen jälkeenkin kun ilmat lämpenevät (Hall ym. 1972, Simini ja Leone 1986a, Northover 1987). Veden ja ravinteiden otto riippuu lämpötilasta, joten kun lämpötila nousee haihdutus ja ravinteiden otto lisääntyy ja samalla suolan otto lisääntyy.

2.1.2 Eri kasvien herkkyys suolalle

2.1.2.1 Lehtipuut

Suolalle herkiksi lehtipuiksi on todettu mm. sokerivaahtera (Acer saccharum), punavaahtera (A. rubrum), lehmus (Tilia americana) jalava (Ulmus americana), valkopyökki (Carpinus betulus), pähkinäpensas (Corylus avellana) ja leppä (Alnus sp.). Kohtuullisen hyvin suolaa sietävät koivu (Betula papyrifera), haapa (Populus tremula) ja pyökki (Fagus sylvatica). Suolaa hyvin sietävät mm. valko- ja punatammi (Quercus alba, Q. rubra), metsävaahtera (A. platanoides) ja ruotsinpihlaja (Sorbus intermedia) (Sauer 1967, Rich 1972, Rössler ym. 1986, Priebe 1990). Holmes ja Baker (1965) raportoivat sokerivaahteralla vakavia vaurioita kun lehtien suolapitoisuus oli yli 10 mg Cl/g (yli 20 kertaa normaalipitoisuus) ja 0.04-0.53 mg Na/g. Vähäisiä tai selviä vaurioita esiintyi, kun pitoisuudet olivat 4-10 mg/g kloridia (8-20 kertaa normaalipitoisuus) ja 0.009-0.057 mg/g natriumia. Vaurioita ei esiintynyt kun pitoisuudet olivat 0.5-6 mg/g kloridia ja 0.006-0.84 mg/g natriumia.

Prinzing (1987) tutki Stuttgartin kaupungissa 224 katuja ja tietä, joiden varsilla kasvavat lehtipuut kuten vaahtera, hevoskastanja (Aesculus hippocastanum), pähkinäpensas (Corylus avellana), valkopyökki (Carpinus betulus), plataani (Platanus x acerifolia) ja lehmus kärsivät lehtien ruskistumisesta. Hän totesi vähintään

50 % puista vaurioituneen, suurimmilla kaduilla jopa 90-100 % puista osoitti oireita. Pääsyyksi puiden vaurioitumiseen hän osoitti maantiesuolan käytön, erityisesti yksityisen käytön. Kaikkiaan hän arvioi vaurioituneita puita olevan 30 000-40 000.

2.1.2.2 Havupuut

Eri mäntylajeista hyvin suolaa sietäviksi on todettu mm. ponderosamänty (Pinus ponderosa) ja mustamänty (Pinus nigra). Kohtuullisen herkkiä suolalle ovat mm. punamänty (Pinus resinosa) ja tavallinen mänty (Pinus sylvestris). Erittäin herkkiä suolalle ovat mm. strobusermänty (Pinus strobus), banksinmänty (Pinus banksiana) ja sembramänty (Pinus cembra), joilla jo vähäisilläkin suolamäärillä on todettu runsaasti oireita (Rich 1972, Townsend ja Kwolek 1987). Bedunah ja Trilica (1981) havaitsivat suolaisessa maassa kasvavan ponderosamännyn (Pinus ponderosa) fotosynteesin laskevan, mikä ilmeisesti aiheutui oksien natrium- ja kloridipitoisuuksien noususta. Hofstra ja Hall (1971) raportoivat männyllä (Pinus sylvestris) 15 metrin päässä runsaasti suolatun tien varrelta seuraavanlaisia pitoisuuksia ja oireita: Kun neulasten vaurioitumisaste oli 10 %, vihreissä neulasissa natriumin ja kloridin pitoisuudet olivat 2.6 mg/g ja 3.6 mg/g, ruskistuneiden neulasten pitoisuudet vastaavasti olivat 6.0 ja 7.6 mg/g. Kun vaurioitumisaste oli 100 %, ruskistuneiden neulasten vastaavat pitoisuudet olivat 13.2 mg/g ja 20.6 mg/g.

Davidson (1970) havaitsi kokeellisessa kenttätutkimuksessaan runsaasti suolatun tien varrelle istutetuista mäntylajeista yhden talven suolauksen jälkeen seuraavat oireet: 62 % strobusermännystä, 40 % punamännystä, 33 % tavallisista männystä ja 28 % mustamännystä oli joko kuollut tai erittäin huonokuntoisia.

Kuusi (Picea abies) on kohtuullisen herkkä suolalle, mutta silti se on yleinen tienvarsilla kasvava puulaji (Lumis ym. 1973, Bogemans ym. 1989). Muista kuusilajeista mainittakoon valkokuusi (Picea

glauca), joka on herkempi kuin kuusi ja ^{Serbian kuusi} okakuusi (Picea pungens), joka taas on kestävä suolalle. Behm ja Kessler (1971) havaitsivat kuusella esiintyvän ulkoisia vaurioita, kun neulasten kloridipitoisuus oli yli 4 mg/g. Maksimipitoisuuksiksi he mittasivat jopa 8 mg Cl/g taustapitoisuuksien ollessa 0.4-1 mg Cl/g. Bogemans ym. (1989) teki kuusella laboratoriotutkimuksia, joissa kuusia kasteltiin kymmenen kertaa 3.5 g/l natriumkloridia sisältävällä liuoksella. Pitoisuudet käsiteltyjen puiden neulasissa olivat 10 viikon kuluttua 3.6 mg/g natriumia ja 5 mg/g kloridia, kontrollipitoisuuksien ollessa 0.76 mg/g ja 0.3 mg/g. Pitoisuudet neulasissa nousivat vielä 15 viikon jälkeen suolakäsittelystä, jonka jälkeen ne alkoivat laskea. Oksissa suolapitoisuudet nousivat koko 20 viikkoa kestäneen kokeen ajan.

2.1.2.3 Pensaat

Pensaista koripaju (Salix viminalis), syreeni (Syringa vulgaris) ja orapaatsama (Rhamnus cathartica) ovat suolaa hyvin kestäviä lajeja. Koiranheisi (Viburnum opulus), japaninhappomarja (Berberis thunbergii) ovat kohtuullisen herkkiä suolalle. Kanukka (Cornus sp.) ja angervo (Spirea sp.) puolestaan ovat herkkiä suolalle (Lumis ym. 1973, Priebe 1990).

2.1.2.4 Ruoho- ja palkokasvit

Rannikolla suolaisessa ympäristössä kasvavien ruohojen on todettu viihtyvän hyvin myös suolattujen teiden varsilla, kuten esimerkiksi kujasorsimo (Puccinellia distans), meriratamo (Plantago maritima) ja suolasolmukki (Spergularia marina). Suolapitoisuuksien vähetessä tieltä kauemmas siirryttäessä, myös kasvien määrä vähenee (Scott ja Davison 1985).

Suolalle herkiksi heinälajeiksi on todettu mm. niittynurmikka (Poa pratensis), kylänurmikka (P. annua) ja rölly (Agrostis stolonifera, A. tenuis) (Greub ym. 1985, Liem ym. 1985), joilla suola erityi

sesti hidastaa itämistä. Palkokasveista sinimailanen (Medicago sativa) on suhteellisen kestävä (Greub ym. 1985). Suolan on todettu hidastavan mm. ukonnauriin (Erysimum diffusum) ja siankärsämön (Achillea millefolium) kasvua (Banasova 1985).

Suolalle kestäviksi lajeiksi on todettu mm. eri juolavehnlajit (Agropyron sp.), englanninraiheinä (Lolium perenne), eräät suolasorsimolajit (Puccinellia sp.), ruokopuntarpää (Alopecurus arundinaeus), karheanurmikka (P. trivialis), eräät villivehnlajit (Elymus sp.) ja ruokohelpi (Phalaris arundinacea). Erityisen kestäväksi on havaittu eräs natalaji (Festuca rupicola), jonka on todettu kestävän vain vähäisin oirein 2700 kg NaCl/km talven aikana vastaavan suolamäärän (Roberts ja Zybura 1967, Banasova 1985, Greub ym. 1985).

2.1.3 Natriumin, kloridin ja kalsiumin merkitys kasveille

Natriumin taustapitoisuus havupuiden neulasissa ja silmuissa puulajista riippuen on 0.5 - 10 mg/g. Toksisuusraja-arvo monille lajeille on kuitenkin noin 5 mg/g (Smith 1970). Spotts ym. 1972 määrittivät ponderosamännyn neulasten taustapitoisuudeksi vain 0.07 mg Na/g. Yleensä natrium ja kloridi kulkeutuvat kasveihin yhtäaikaan, vaikka toisen alkuaineen ylimäärä ei välttämättä merkitsekään toisen ylimäärää (Smith 1970, Trockner ja Albert 1986a).

Kloridin on todettu olevan ensisijainen vaurioiden aiheuttaja (Holmes 1961, Wester ja Cohen 1968, Walton 1969, Rich 1972). Natrium ja kloridi ovat suurina pitoisuuksina myrkyllisiä kasveille ja yhdessä niiden vaikutusten on todettu vahvistuvan; kloridin läsnäollessa natrium edistää oireiden puhkeamista ja lisää niiden määrää enemmän kuin muut kationit (Spotts ym 1972). Joskus natrium saattaa olla jopa myrkyllisempi kuin kloridi, sillä se pääsee helpommin kasviin sisälle ja on siellä pysyvämpi kuin kloridi. Wyttenbach ym. (1988) mittasivat kuusella kloridin taustapitoisuudeksi noin 0.38 mg/g ja natriumin taustapitoisuudeksi noin 0.004

mg/g. Menlove (1973) puolestaan on mitannut männyn neulasten taustapitoisuudeksi 0.09 mg NaCl/g.

Natrium ja kloridi eivät yleensä aiheuta tärkeiden ravinteiden puutosta kasveissa vaan vauriot aiheutuvat ennemmin natriumkloridin myrkyllisyydestä (Hutchinson ja Olson 1967, Spotts 1972, Hall ym. 1973). Natrium saattaa kuitenkin aiheuttaa kaliumin puutosta, koska se estää kaliumin ottoa kasviin (Guttay 1976) ja toisaalta korvaa kaliumia kasvisoluissa (Zulauf, 1966). Gabriels (1978) totesikin tutkimuksissaan säilätuutilla (Vriesea splendens) ja ruukkuat-salealla (Rhododendron simsii) suolan natriumin ilmeisesti aiheuttavan kalsiumin ja/tai magnesiumin puutosta. Yleensä suolan vaurioittamissa puissa typen, fosforin ja kaliumin pitoisuudet ovat alhaisemmat kuin terveissä puissa ja kalsiumin ja magnesiumin pitoisuudet ovat korkeammat (Leh 1973, Ernst ja Feldermann 1975, Trockner ja Albert 1986b). Zolg (1983) puolestaan totesi eräillä suolalle altistetuilla lehtipuulajeilla (hevoskastanja (Aesculus hippocastanum), plataani (Platanus hybrida) ja lehmus (Tilia euchlora)) typpi-, kalium- ja magnesiumpitoisuuksien kohoamista.

Päinvastoin kuin maassa, kasveissa natriumin pitoisuudet ovat yleensä korkeammat kuin kloridin (Lumis ym. 1976, Trockner ja Albert 1986a). Suolalle herkillä lajeilla on suola-altistuksessa todettu suuremmat suolapitoisuudet kun suolaa hyvin kestäville lajeilla (Leh 1973, Trockner ja Albert 1986a).

Kalsiumin on todettu lisäävän kaliumin ottoa ja vähentävän natriumin ottoa kasviin (K/Na - suhde kasvaa). Natrium- ja kalsiumkloridin sekoitussuhteella 75/25 on todettu natriumin kertymisen kuusen neulasiin ja oksiin selvästi alentuneen (Bogemans ym. 1989). Pieni määrä kalsiumia onkin kasville eduksi. Kalsium alentaa myös kloridipitoisuuksia kasveissa, sillä se estää kloridin ottoa kasveihin (Rich 1972). Strobusermännyn oksien ja neulasten kalsiumpitoisuuksissa ei ole todettu muutoksia natriumkloridin ohella kalsiumkloridilla suolattujen teiden ja suolaamattomien teiden välillä

(Smith 1970). Suolalle erityisen herkällä strobusmännyllä tehdyillä tutkimuksilla havaittiin kalsiumin taustapitoisuudeksi noin 5 mg/g kuiva-ainetta (Smith 1970). Kuusen neulasten vastaavaksi taustapitoisuudeksi on mitattu 8.3 mg Ca/g (Wyttenbach ja Tobler, 1988) ja ponderosamännyn taustapitoisuudeksi 2.4 mg Ca/g (Spotts ym. 1972). Kesällä pölynsidontasuolauksessa käytettynä kalsiumkloridin ei ole todettu aiheuttavan kasvillisuusvaurioita, mutta suolauksen on havaittu nostavan kasvillisuuden kloridipitoisuuksia. Pitoisuuksien kohoaminen on kuitenkin vähäistä (Dust suppressant study 1988).

Breckle ja Schüre (1985) totesivat, että suolalle altistettujen puiden natriumpitoisuudet olivat suuremmat pehmeässä puun pintaosassa ja pienemmät kovassa ydinpuussa. Puun vuosiluston natriumpitoisuuden ja vastaavan vuoden suolausmäärien kesken ei todettu korrelaatiota.

Ernst ja Feldermann (1975) havaitsivat lehmuksella tekemissään tutkimuksissa, että puun kaarnan sisäosan Na- ja Cl-pitoisuuksien määrittämisellä voidaan ennakoida suolapitoisuuksien kohoamista ennen kuin puussa ilmenee ulkoisia vaurioita. He määrittivät kloridin toksisuusraja-arvoksi kaarnassa 2.7 mg/g ja natriumille vastaavasti 1.8 mg/g.

Mekdaschi ym. (1988) tutkivat kuinka suolavaurioista kärsivien tienvarren lehtipuiden kastanjan (Aesculus sp.) ja lehmuksen, kuntoa voisi parantaa maan parannuksella ja lannoituksen avulla. He käyttivät maanparannusaineina kokeissaan kipsiä, ammoniumnitraattia ja kaliummagnesiumsulfaattia joko yksin tai yhdistelmänä. He totesivat, että maanparannuksen avulla voidaan ehkäistä suolan aiheuttamia kasvillisuusvaurioita ja vähentää maan ja kasvien suolapitoisuuksia, mutta muutos tapahtuu hitaasti. He havaitsivat, että vain vähän vaurioituneiden puiden kunnon paraneminen vaatii 2-3 vuoden käsittelyajan ja pahoin vaurioituneiden puiden vaativan jopa 5-10 vuoden käsittelyajan. Paras tulos

saatiin käyttämällä kipsin lisäksi sekä ammoniumnitraattia että kaliummagnesiumsulfaattia (mahdollisesti myös superfosfaattia) 2-3 kg kutakin kerrallaan puulle. Lisäksi maata kuohkeutettiin ja riittävästä kosteudesta huolehdittiin. Kokeessa käsittelyt tehtiin kolme kertaa huhti-heinäkuun aikana.

2.3 Suolan aiheuttamat ulkoiset oireet kasvillisuudessa

Kun suolapitoisuus kasvissa kasvaa sietorajan yli, kasvi alkaa vaurioitua ja siinä voidaan havaita erilaisia ulkoisia oireita. Suolapitoisuuden (Na ja Cl -ionien pitoisuuden) kohoamisen sekä maassa että kasvin pinnalla ja sisällä ja ulkoisten oireiden määrän ja vaurioasteen välillä on todettu selvä korrelaatio (Leh 1973, Ernst ja Feldermann 1975, Sucoff ym. 1975, Mekdaschi ym. 1988). Oireiden määrä vaihtelee suuresti kasvilajista toiseen aiheutuen mm. kasvin iästä ja erilaisista ympäristötekijöistä.

Tyypillisiä suolan aiheuttamia oireita lehtipuilla ovat aluksi lehtien normaalia tummempi väri, myöhemmin lehdet ruskistuvat pronssinruskeiksi reunoilta ja kärjestä alkaen edeten kohti tyveä. Myöhemmin lehden väri muuttuu tummemman ruskeaksi, lehti kuivuu ja muotoutuu kuppimaiseksi. Pahimmassa tapauksessa voi koko oksa tai jopa koko kasvi kuolla. Sekä havu- että lehtipuilla teiden varsilla on havaittu runsaasti suolattujen teiden varsilla tien puoleisten oksien olleen jopa paljaita ja kuivuneita. Terveen ja ruskistuneen solukon välillä on selvä raja. (Holmes 1961, Lacasse ja Rich 1964, Holmes ja Baker 1966, Wester ja Cohen 1968, Walton 1969, Westing 1969, Shortle ja Rich 1970, Hall ym. 1973, Lumis ym. 1973, Fleck 1987). Pudonneiden lehtien mukana maahan joutuu uudelleen niissä olevaa suolaa, jonka kasvi ottaa maasta jälleen juurien kautta (ns. suolasykli) (Holmes 1961, Road transport research 1989). Boyce (1954) osoitti kloridin kertyvän suurina pitoisuuksina juuri lehtien kärkiin ja reunoille riippumatta siitä mistä suola oli kasviin kulkeutunut. Natrium taas varastoituu pääasiassa kasvin

oksiin ja varteen ja alkaa kerääntyä lehtiin vasta kun pitoisuudet muualla tulevat liian suuriksi (Mekdaschi ym. 1988).

Ruukkukasveilla on myös todettu suolan aiheuttamina oireina lehtien kärkien kellastumista ja ruskistumista ja lehtien käyristymistä (Gabriels 1978).

Havupuut ovat lehtipuita herkempiä suolalle, sillä ne eivät pudota neulasiaan vuosittain jolloin natrium ja kloridi voivat kerääntyä puuhun usean vuoden aikana ympärivuotisesti (Rich 1972, Dimitri ja Brod 1982, Simini ja Leone 1986). Esimerkiksi kuusen (Picea abies), joka on varsin yleinen teiden varsilla kasvava laji, on todettu olevan herkkä suolalle (Bogemans ym. 1989). Havupuilla suolan aiheuttamia ulkoisia oireita ovat neulasten ruskistuminen kärjestä alkaen. Vaurion edetessä pronssinruskea väri etenee kohti tyveä ja lopulta neulanen kuivuu ja putoaa pois. Raja vaurioituneen ja terveen solukon välillä neulasessa on selvä (Behm ja Kessler 1971, Shortle ja Rich 1970, Smith 1970, Hofstra ja Hall 1971, Spotts ym. 1972, Lumis ym. 1973, Sucoff ym. 1975, McCune ym. 1977, Pyykkö 1977, Barrick ym. 1979, Simini ja Leone 1986, Herrick 1988). Samojen puiden ruskistuneissa neulasissa natriumin ja kloridin pitoisuudet on todettu suuremmiksi kuin terveissä, vihreissä neulasissa (Hofstra ja Hall 1971, Hall ym. 1972, Menlove 1973). Sucoff ym. (1975) tulivat samaan johtopäätökseen, joskin yksilökohtaisia eroja oli.

2.4 Suolan aiheuttamat hienorakenteen muutokset kasveissa

Pyykkö (1977) totesi mikroskooppitutkimuksissaan (SEM, fuoresenssimikroskooppi) suolaroiskeille altistuneissa männyissa (Pinus sylvestris) neulasen ilmarakojen lähellä pieniä repeytymiä ja halkeamia, joista suola pääsi neulasen sisälle. Lisäksi hän havaitsi neulasen pinnalla kiteytyneitä suolapartikkeleja ja sisällä voimakkaasti fluoresoivia suolakiteitä.

Myös kasvien solurakenteissa on havaittu maan liiallisen suolaisuuden aiheuttamia muutoksia, mm. viherhiukkasten ja mitokondrioiden koon suurenemista, suurten lipidipisaroiden määrän lisääntymistä ja voimakasta vakuolisaatiota maltsalla (Atriplex halimus) (Blumenthal-Goldschmidt ja Poljakoff-Mayber 1968). Müller ja Santarius (1978) havaitsivat suolaisessa maassa kasvaneella ohralla natriumkloridin kerääntyneen lehtien soluihin ja samalla viherhiukkasten solukalvojen lipidikonsentraation pienenevän, mikä oletettavasti lisäsi ohran suolankestävyyttä eli ohra akklimoitui korkealle suolapitoisuudelle. Tarhapavulla (Phaseolus vulgaris) havaittiin suolaisessa liuoksessa kavatetulla pienemmät, mutta paksummat lehdet kuin kontrollikasveissa. Paksumuuden lisäys aiheutui hohkatylppysolukkojen paksuuntumisesta (Wignarajah 1975).

2.5 Suolan vaikutukset kasvuun

Flowers (1973) havaitsi lisääntyneen suolapitoisuuden herneellä (Pisum sativum) ja kilokilla (Suaeda maritima) alentavan hapen ottoa mitokondrioihin ja siten huonontavan kasvin happitaloutta. Zolig (1983) totesi suolalle altistuneilla lehtipuilla fotosynteesin alenevan, jolloin myös kasvu hidastuu (Kammerbauer ym. 1987, Sauter ym. 1987).

Pieni määrä kalsiumkloridia voi jopa stimuloida puiden kasvua. Walton (1969) osoitti vaahteralla tekemissään tutkimuksissa kalsiumkloridin ($25 \text{ g CaCl}_2/\text{m}^2$) kymmenen kerran käsittelynä lisäävän kasvua mutta natriumkloridi ja suuremmat määrät kalsiumkloridia sen sijaan hidastivat kasvua. Suurten suolamäärien on yleensä todettu aiheuttavan kasvun hidastumista joko koko kasvissa tai sen osissa (esimerkiksi lehdet) (Westing 1969, Fleck ym. 1987) sen mukaan onko suola päässyt kasviin juurien vai ilman kautta. Suolan (NaCl) on todettu myös hidastavan puiden kukintaa ja lehtien aukeamista (Lumis ym. 1973, Hofstra ja Lumis 1975). Lisäksi suola aiheuttaa myös uusien versojen kasvun hidastumista (Westing 1969, Banasova 1985, Priebe 1990).

Havupuilla vaikutukset ovat samantapaiset. Liiallinen määrä suolaa hidastaa uusien silmujen puhkeamista ja uusien versojen kasvua. Vuosikasvu pienenee ja neulasen jäävät normaalia lyhyemmiksi. Jopa saman puun eri puolilla kasvu on ollut pienempää suolaroiskeille altistuneella puolella (Hall ym. 1972, Pyykkö 1977, Simini ja Leone 1986). Maan kautta tulevan suola-altistuksen on havaittu vaikuttavan koko kasvin kasvuun (Banasova 1985).

2.6 Suolan vaikutukset hyötykasveilla

Yleensä lajit, jotka muodostavat pitkän pääjuuren tai joilla juuristo kasvaa nopeasti syvempiin maakerroksiin, selviytyvät paremmin suolaisessa maassa kuin kasvit, joilla juuret ovat lyhyet tai kasvavat hitaasti. Esimerkiksi sipulin on todettu sietävän hyvin suolaa, sillä se juurtuu nopeasti (Pasternak ym. 1979). Viljelykasveilla ylimäärä suolaa pienentää kasvua ja alentaa sadon määrää (Ehlig 1964, Northover 1987). Northover havaitsi runsaasti suolatun tien varrella (243 tonnia/km talven aikana, 320 kg/km/ker-täksittely 4-kaistaiselle moottoritielelle) kasvaneissa persikkapuihin (Prunus persica) tien vieressä vakavia vaurioita; mm. kärkisilmujen kuolemia. Persikkasato oli myös selvästi pienempi tien vierellä ja persikat olivat kooltaan pienempiä. Oireita oli jopa 80 metrin etäisyydellä tiestä. Sadon pienenemistä, lehtien ruskistumista ja kuolemista on todettu myös suolalle altistetulla vadelmalla (Rubus idaeus), boysenmarjalla (Rubus locanobaccus 'boysen') ja mustikalla (Vaccinium myrtillus) (Ehlig 1964). Hofstra ja Lumis (1975) puolestaan havaitsivat omenapuun (Malus sylvestris) kukinnan hidastuvan ja uusien versojen kuolevan ja sadon pienenevän, kun pitoisuudet oksissa olivat yli 2 mg/g natriumia ja 5 mg/g kloridia.

2.7 Muut vaikutukset

Holmes (1961) havaitsi että suolalle altistuneiden puiden juurilta oli ruoho kuollut ja totesi tämän olevan ensimmäinen oire suolan

aiheuttamista vaurioista. Toisaalta tietyt ruohot ovat kestävämpiä suolalle kuin puuvartistet kasvit (Westing, 1969). Natriumkloridin on todettu inhiboivan siementen itämistä ja alentavan ruohojen kasvua. Herkkyys suolan aiheuttamille vaurioille vaihtelee kuitenkin suuresti lajeittain (Roberts ja Zybura 1967, Liem ym. 1985, Greub ym. 1985)

Trockner ja Albert (1986b) totesivat tienvarren lehtipuilla (mm. vaahtera, lehmus, koivu, kirsikkapuu, hevoscastanja, plataani) lehtien suolapitoisuuden noustessa ja vaurioiden lisääntyessä tärkeimpien aminohappojen pitoisuuksien laskevan selvästi kun taas glutamiinihapon, glutamiinin, seriinin ja kysteiinin pitoisuudet nousivat. Priebe ja Jäger (1978) raportoivat myös muutoksia aminohappokoostumuksessa ja vapaiden aminohappojen pitoisuuksissa eri maltsalajeilla (Atriplex sp.), härkäpavulla (Vicia faba) ja suolayrtillä (Salicornia europaea). He totesivat kasvien glutamiini- ja aspariinihapon pitoisuuden laskevan ja proliinin pitoisuuden nousevan. Trockner ja Albert (1986b) havaitsivat myös eri lajeille tyypillisten sokerialkoholien määrän kohoamista (esimerkiksi plataanilla pinitoli, kirsikkapuulla sorbitoli, vaahteralla dulsitoli). Vaahteralla on todettu mahlan suolapitoisuuden lisääntyessä myös sen sokeripitoisuuden lisääntyvän. Ilmeisesti puu kompensoi huonoa kuntoaan väkevöimällä mahlaa (Herrick 1988). Zolg (1983) puolestaan havaitsi lehmuksella, plataanilla ja kastanjalla hiilihydraattien (glukoosi, sukroosi, sakkaroosi, tärkkelys, oligo- ja polysakkaridit) pitoisuuksien alenemista.

Braun ja Flückiger (1984) totesivat, että orapihlajassa kirvojen määrä lisääntyi, kun sitä käsiteltiin 100 g/l väkevyisellä natriumkloridiliuoksella. Merkittävää muutosta ei vielä tapahtunut kun käsittelynä oli 20 mg/l. Syyksi he arvelivat suolan aiheuttamaa kuivuutta sekä aminohappojen ja sokeripitoisuuden nousua.

Suokasvillisuuden on havaittu olevan herkkää suolalle, sillä se on tottunut kasvamaan alhaisessa suolapitoisuudessa ja pH:ssa. Erityisesti rahkasammalen (Sphagnum sp.) on todettu olevan herkkä suolalle, sen kasvu ja lisääntyminen hidastuivat merkittävästi kun kasvualustan veden suolapitoisuus ylitti 0.3 mg/l. Osmankäämin (Typha sp.) on puolestaan todettu sietävän hyvin suolaa (Wilcox 1985, Wilcox ja Andrus 1987).

2.8 Suolan aiheuttamiin kasvillisuusvaurioihin vaikuttavia tekijöitä

2.8.1 Ympäristötekijät

Suolan aiheuttamien oireiden on todettu ilmenevän kevättalvesta (helmi-maaliskuulla) havupuilla tai alkukeväästä (huhti-toukokuulla) lehtipuilla, kun uusien versojen kasvu alkaa (Lumis ym. 1973, Sucoff ym. 1975, Simini ja Leone 1986a). Myös laboratoriokokeissa strobustumännillä (Pinus strobus) Hall ym. (1972) havaitsivat oireiden ilmenevän kun lämpötila nousi +1.5 °C:sta +15 °C:een. Northover (1987) puolestaan raportoi oireita jo +5 °C lämpötilassa.

Northover (1987) on tutkinut myös kosteuden vaikutusta suolan liikkumiseen kasvissa. Hän havaitsi, että jos ilma on kuivaa (RH 40%), kasvien lehtien pinnalla oleva suola kiteytyy eikä pääse kasviin sisälle. Ilman ollessa kosteaa (RH 90%), suola on liukoista ja pääsee helpommin kasviin. McCune ym. (1977) puolestaan totesivat, että jos suolaisen sumun kosteuspitoisuus nousee 50 %:sta 85 %:iin, suolan vaikutukset ovat jopa kaksi kertaa voimakkaammat. Toisaalta Simini ja Leone (1986a) havaitsivat, että jos kevät oli sateinen ja kostea, suolatun tien varrella puiden oireet vähenivät verrattuna kuivana keväänä esiintyvien oireiden määrään, koska suola huuhtoutui pois nopeammin. Myös leutojen ja sateisten talvien jälkeen erityisesti hiekkamailla kasvillisuuden oireet ovat olleet vähäisempiä (Liem ym., 1985). Ei ole näyttöä siitä, että kasvin

pinnalla olevat suolakiteet aiheuttaisivat vahinkoa (Northover 1987).

2.8.2 Kasvien perinnöllisten ominaisuuksien vaikutukset suolan- sietoon

Kasvien herkkyys suolalle vaihtelee suuresti kasvilajeittain. Nuorten taimien ja versojen on todettu olevan herkempiä suolalle kuin täysikasvuisten kasvien (Pasternak ja Twersky 1979, Liem ym. 1984). Toiset lajit sietävät korkeampia suolapitoisuuksia kuin toiset ennen kuin oireita ilmenee. Suolalle herkillä lajeilla suolapitoisuuksien on todettu oleva korkeampia kuin hyvin suolaa sietävillä lajeilla (Shortle ja Rich 1970, Townsend ja Kwolek 1987, Fleck ym. 1988).

Havupuilla ensimmäisen vuosikerran neulasissa ei olla vielä havaittu oireita, vaikka pitoisuudet neulasissa olisivatkin koho-
neita normaaliin verrattuna. Vasta toisen vuosikerran neulaset ovat osoittaneet ulkoisia oireita suolauksen jatkuessa. Myös pitoisuudet ovat olleet korkeammat toisen vuosikerran kuin ensimmäisen vuosikerran neulasissa (Holmes 1961, Hall ym. 1972, Sucoff ym. 1972, McCune ym. 1977). McCune ym. (1977) havaitsivat, että lehtipuilla nuorimmat lehdet olivat herkimpiä suolalle, sillä niissä oireet olivat vakavimmat. Pitoisuudet pienenevät kesän mittaan jääden kuitenkin yleensä korkeammiksi suolattujen teiden varsilla kuin suolaamattomien teiden varsilla (esim. Menlove 1973).

Barrick ym. (1979) ovat esittäneet, että neulasen morfologia (esim. vahakerroksen paksuus) ei selitä eri puiden herkkyyseroja vaan kasvin suolankestävyys riippuu kasvisolujen elävien osien siety-
kyvystä. Lumis ym. (1973) ja Simini ja Leone (1986b) puolestaan ovat esittäneet, että havupuiden neulasten vahakerroksen paksuus ja koostumus estäisi suolan pääsyä neulasen sisälle ja lisäisi näin puun suolankestävyyttä. Simini ja Leone selittivät ristiriitaisen tuloksen sillä, että Barrickin ym. (1979) käyttämä vahan sisäl-

tämien alkaanien määritysmenetelmä ei ollut riittävä erottelemaan pitkäketjuisten alkaanien osuutta vahakerroksesta. Vahan sisältämien pitkäketjuisten alkaanien tiedetään vaikuttavan ainakin osaksi läpäisevyyteen ja siten suolansietokykyyn.

2.9 Muita puiden vaurioitumiseen vaikuttavia tekijöitä

Pelkästään moottoriajoneuvojen päästöille altistetuilla kuusilla (Picea abies ja Abies alba) on sekä kenttätutkimuksissa että kammioaltistuksessa todettu neulasten vahapinnan hajoamista ja vahasäikeiden sulautumista toisiinsa, jolloin joko haihtuminen lisääntyy tai ilmaraot tukkeutuvat (Sauter ym. 1987, Sauter ja Pambor 1989). Kuusien fotosynteesin ja hengityksen ja sitä kautta myös kasvun on moottoriajoneuvojen päästöjen vaikutuksesta todettu hidastuvan (Kammerbauer ym. 1987, Sauter ym. 1987). Höster (1977) on tutkinut puiden altistumista kaupunki- ja teollisuusalueilla erilaisille ympäristöstresseille ja totesi teiden suolauksen olevan yksi tärkeimpiä puustovaurioiden aiheuttajia. Muiksi merkittäviksi vaurioiden aiheuttajiksi hän mainitsi mm. ilman epäpuhtaudet, juurten ja rungon mekaanisen vahingoittumisen, teiden ja katujen päällystämisestä aiheutuvan ympäristöolosuhteiden muutoksen, ilman ja maan kuivuuden, ravinteiden puutoksen ja hyönteistuhot.

2.10 Esimerkkitutkimuksia

Smith (1970) tutki maantiesuolan vaikutuksia strobusmäntyyn kenttätutkimuksena. Tutkittavat puut sijaitsivat 2-kaistaisen tien varrella, jolle talven aikana laitettiin suolaa yhteensä 19 700 kg/km NaCl ja 840 kg/km CaCl₂. Vastaavat määrät kertosuolauksena olivat noin 290 kg/km NaCl ja 12 kg/km CaCl₂. Hän havaitsi neulasten natriumpitoisuuksien olevan suolauksen jälkeen noin 10 mg/g kuiva-ainetta ja jopa 19 mg/g pitoisuuksia löytyi. Neulasissa havaittiin myös näkyviä vaurioita, kuten neulasten ruskistumista.

Holmes ja Baker (1966) havaitsivat sokerivaahteran lehtien natrium- ja kloridipitoisuuksien olleen koholla kesällä talven suolauksen jälkeen, mutta oireet eivät olleet kovin suuria. Tutkitut puut sijaitsivat tien varrella, jota suolattiin vain talvella. Suolaa käytettiin 220 kg/km yhteensä 3 300 kg/km talven aikana. Lehtien natriumpitoisuudeksi mitattiin 0.024 mg/g ja kloridipitoisuudeksi 2.0 mg/g.

2.11 Suola maaperässä

Maantiesuolaa (NaCl ja CaCl_2) kulkeutuu tieltä tulevien sohjo- ja vesiroiskeiden mukana tien penkalle, josta se lumen ja jään sulaessa imeytyy maahan. Suola voi jossain määrin tunkeutua maahan myös maan ollessa jäässä, sillä suola sulattaa jäätä. Tien viereisen maan muodoista ja valunnasta riippuen suola voi kulkeutua pitkiäkin matkoja tiestä poispäin. Auroisroiskeiden mukana suolapitoinen lumi voi kulkeutua jopa 10 metrin päähän tien reunasta (Rich 1972, Hofstra ja Smith 1984). Maaperään joutuessaan maantiesuola nostaa maan pH:ta, sähkönjohtokykyä sekä natrium- ja kloridipitoisuuksia (Zulauf 1966, Hutchinson ja Olson 1967, Prior ja Berthoeux 1967, Spotts ym. 1972, Banasova 1985, Fleck ym. 1988, Herrick 1988).

Maahan joutuessaan suolan natrium syrjäyttää maarakeisiin adsorboituneita kalsium-, kalium- ja magnesiumioneja aiheuttaen niiden huuhtoutumista maasta ja siten nostaa maan pH:ta. Toisaalta tällöin kasveille saatavilla olevien ja niille välttämättömien ravinteiden kalsiumin, kaliumin ja magnesiumin määrä vähenee (Holmes 1961, Hutchinson ja Olson 1967, Prior ja Berthoeux 1967, Hofstra ja Smith 1984). Samalla maan mururakenne muuttuu siten, että maa tulee tiiviimmäksi, sen läpäisevyys ja vedenpidätuskyky huononee, mikä huonontaa maan happiolosuhteita (Holmes 1961, Lacasse ja Rich 1964, Prior ja Berthoeux 1967, Westing 1969, Road transport research 1989).

Kloridilla ei ole todettu olevan vahingollisia vaikutuksia itse maaperän ominaisuuksiin muuten kuin, että se nostaa maan kloridipitoisuutta (Prior ja Berthoeux 1967).

Kalsium on yleinen maassa oleva kasveille välttämätön alkuaine. Kalsiumia levitetään joko kalkkina tai kipsinä maahan pH:n säätämiseksi (Derome ja Pätilä 1990) tai korvaamaan natriumia maassa. Liian suurina pitoisuuksina voi kalsiumkin olla kasveille myrkyllinen (Dimitri ja Brod 1982).

2.12 Maaperän suolapitoisuuksiin vaikuttavia tekijöitä

Tien viereisen maaperän suolapitoisuus ja suolan kertyminen riippuu pääasiassa suolauksen määrästä, maatyypistä, maan kosteudesta, haihdunnasta, sateisuudesta, maan muodoista, pintavalunnasta ja siitä, onko maa sula vai jäinen (Prior ja Berthoeux 1967, Westing 1969, Priebe 1990). Esimerkiksi Hutchinson ja Olson (1967) mittasivat suolatun tien viereisestä maasta keskimäärin 0.28 mg/g natrium- ja 0.1 mg/g kloridipitoisuuksia, kun suolaamattoman maan vastaavat pitoisuudet olivat 0.039 mg/g ja alle 0.001 mg/g. Banasova (1985) mittasi tien viereisen maaperän suolapitoisuudeksi helmikuussa 1.12 mg/g natriumia ja 6.12 mg/g kloridia. Hofstra ja Smith (1984) puolestaan raportoivat suolatun tien varrelta otetuissa maanäytteissä natriumin maksimipitoisuuksiksi 0.89 mg/g ja kloridin maksimipitoisuuksiksi 0.64 mg/g, kun vastaavat pitoisuudet 200 metrin etäisyydellä olivat 0.012 mg/g ja 0.23 mg/g.

Suolan on todettu kertyvän maahan ajan mittaan (Holmes 1961, Hutchinson ja Olson 1967, Hofstra ja Smith 1984). Tutkimuksissa on todettu talvisuolauksen aiheuttamien suolapitoisuuksien maassa laskevan kevään ja kesän mittaan, mutta jäävän silti korkeammiksi kauemmin suolattujen teiden varsilla, kuin vähän aikaa suolattujen teiden varsilla. Tiiviiseen maahan suola akkumuloituu vuosien mittaan; natriumin on todettu kerääntyvän jopa kaksi kertaan nopeammin kuin kloridin (Hutchinson ja Olson 1967). Kertymisnopeus

riippuu myös mm. maan topografiasta ja valunnasta (Lacasse ja Rich 1964, Hofsta ja Smith 1984, Road transport research 1989). Toisaalta Uudenmaan tie- ja vesirakennuspiirin (1973) tekemän tutkimuksen mukaan tiesuola huuhtoutuu keväällä tien viereisestä maasta "nopeasti ja täydellisesti". Hiekkamailla suolajäännös huuhtoutuu helpommin pois sulamisvesien mukana kuin tiiviillä hiesu- ja savimailla (Prior ja Berthoeux 1967, Behm ja Kessler 1971, Spirig 1981).

Natrium ja kloridi liikkuvat maassa olevan veden mukana, kloridin ollessa liikkuvampi kuin natriumin, sillä se ei sitoudu maahiukkasiin kuten natrium, vaan on vapaana maanesteessä. Tutkimuksissa onkin todettu maan kloridipitoisuuksien olevan pienempiä vastaaviin natriumpitoisuuksiin verrattuna (Hutchinson ja Olson 1967, Ernst ja Feldermann 1975, Hofstra ja Smith 1984, Fleck ym. 1988). Suolan liikkuminen maassa riippuu maan kosteudesta. Kosteassa maassa suola liikkuu maanesteen mukana kohti pohjavettä kun taas kuivassa maassa vesi liikkuu kohti pintaa ja haihtuu suolan jäädessä maahan (Prior ja Berthoeux 1967).

Tutkimuksissa on todettu maan suolapitoisuuden olleen suurin tien vieressä ja maan pintaosissa pienentyen kauemmas tieltä siirryttäessä ja syvemmällä maassa (Lacasse ja Rich 1964, Westing 1969, Prior ja Berthoeux 1967, Hofstra ja Smith 1984, Herrick 1988). Hofstra ja Smith (1984) totesivat tutkimuksessaan maan suolapitoisuuden laskevan taustatasolle noin 30 metrin päässä tien reunasta. Myös Rich (1972), Liem ym. (1984) ja Fleck (1987) tulivat samanlaiseen johtopäätökseen.

Suola aiheuttaa epäsuorasti vahinkoa kasveille, sillä kun maan mururakenne muuttuu tiiviimmäksi, juurten hapensaanti vaikeutuu. Suolan ja maan kuivuuden on todettu vahvistavan toistensa vaikutuksia; molemmat vähentävät kasville saatavissa olevan veden määrää, toisaalta kuivuus vähentää valuntaa ja siten suolan poistumista ja molemmat heikentävät kasvin kuntoa (Westing 1969,

Herrick 1988). Suolan ja kuivuuden aiheuttamien kasvillisuusvaurioiden onkin todettu olevan samantapaisia (Lacasse ja Rich 1964). Sateisuus lisää valuntaa ja maan kosteutta ja laimentaa siten maan suolapitoisuutta (Prior ja Berthoeux 1967, Spotts ym. 1972).

Holmes (1961) tutki maan suolapitoisuuden vaikutuksia mm. tammella (Quercus sp.) ja vaahteralla (Acer sp.). Kun maan kloridipitoisuus oli 0.08 mg/g tammen lehtien kloridipitoisuus oli 0.8 mg/g eikä lehdissä ollut näkyviä oireita. Vaahteralla vastaavasti maan kloridipitoisuuden ollessa 0.8 mg/g lehtien kloridipitoisuus oli 36.4 mg/g, jolloin lehdet olivat joko kuolleet tai erittäin huonossa kunnossa. Hall ym. (1973) puolestaan mittasivat suolatun tien varrella sokerivaahteran (Acer saccharum) lehtien natriumpitoisuudeksi 2.63 mg/g ja kloridipitoisuudeksi 7.6 mg/g kun maan vastaavat pitoisuudet olivat 0.18 mg Na/g ja 0.56 mg Cl/g. Sucoff ym. (1975) totesivat suolatun tien varrella maan natriumpitoisuudeksi 0.07-0.54 mg/g, jolloin tien varrella kasvaneiden punamäntyjen (Pinus resinosa) neulasten natriumpitoisuus oli 0.9-2.6 mg/g. Spotts ym. (1972) puolestaan mittasivat vaurioituneiden ponderosamäntyjen (P. ponderosa) kasvupaikalla maasta uutetun nesteen kloridipitoisuudeksi 75.4-320.6 mg/l kun terveiden puiden kasvupaikalla pitoisuudet vaihtelivat 17.4-168.2 mg/l välillä.

Zulauf (1966) luokitteli kasvit viiteen luokkaan sen mukaan minkälaisia maanesteen suolapitoisuuksia (NaCl) ne kestävät:

- erittäin herkät kasvit, jotka sietävät 0-1250 ppm eli 0-1.4 g/l vahvuisen suolaliuoksen maassa
- herkät kasvit, jotka sietävät 1251-2500 ppm eli 1.4-2.8 g/l vahvuisen suolaliuoksen
- kohtuullisen kestävät kasvit, jotka sietävät 2500-5000 ppm eli 2.8-5.6 g/l
- kestävät kasvit, jotka kestävät 5000-10 000 ppm eli 5.6-11.2 g/l suolaa
- erittäin kestävät kasvit, jotka sietävät yli 10 000 ppm eli yli 11.2 g/l suolaa

3 AINEISTO JA MENETELMÄT

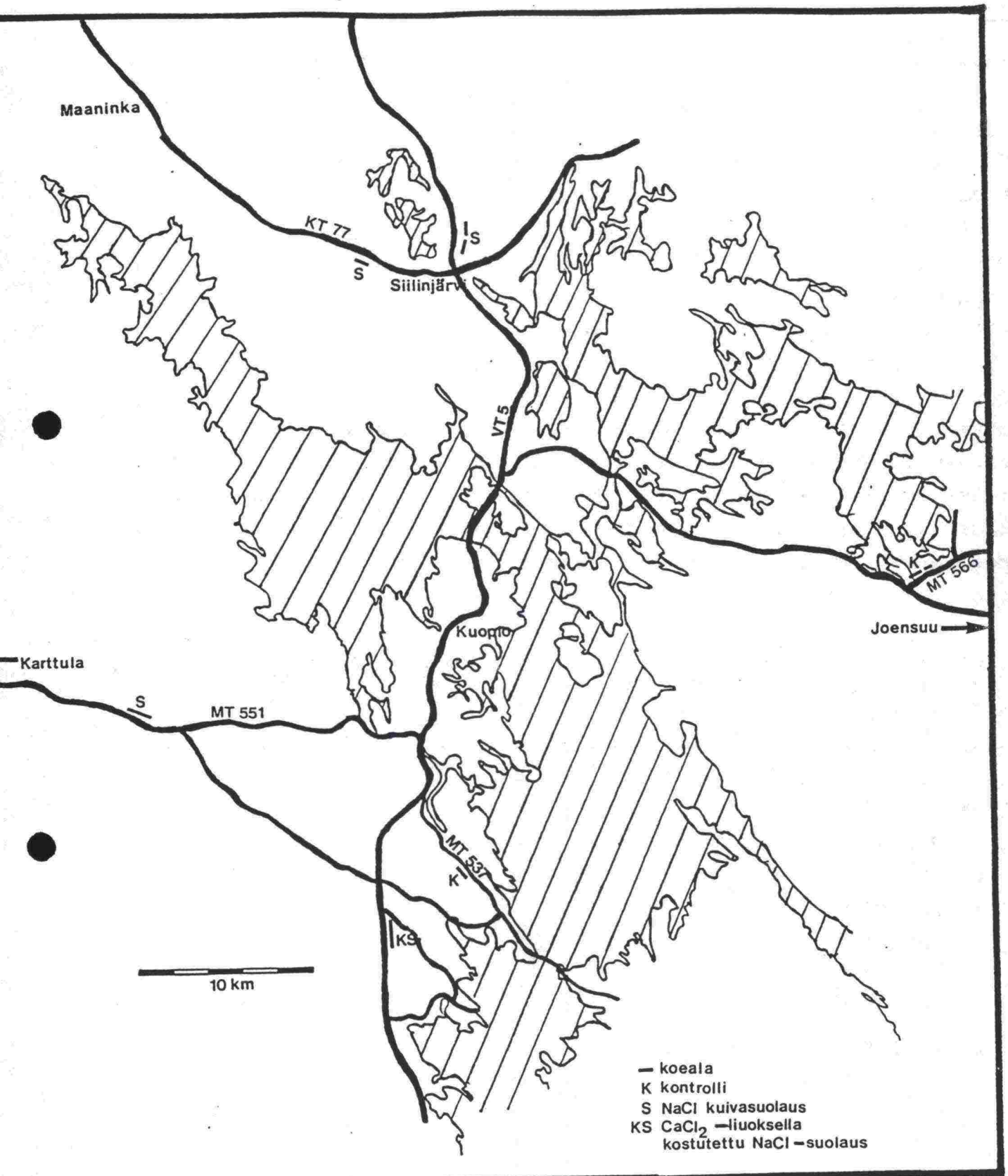
3.1 Liukkaudentorjuntasuolaus (talvisuolaus)

3.1.1 Koealojen kuvaus

Tutkimukseen valittiin koealat kuuden eri määrin suolatun, mutta liikennemäärältään mahdollisimman samankaltaisen tien varrelta. Koealat sijaitsivat valtatie (VT) 5:n varrella Siilinjärven pohjoispuolella (SII) ja Kuopion eteläpuolella (KUO), kantatie (KT) 77:n (Maaningantie, MAA), maantie (MT) 551:n (Karttulantie, KAR), MT 566:n (Melalahdentie, MELA) ja MT 537:n (Puutossalmentie, PUU) varrella. Tiet ja niillä sijaitsevat koealat on esitetty kuvassa 1. Tiedot teille levitetyn suolan määrästä loka-huhtikuussa 1989-90 ovat taulukossa 1 (tiedot saatu kutakin koealaa vastaavasta tiemestariپیiristä) ja teiden liikennemäärät vuonna 1989 taulukossa 2 (TVH/Tierekisteri, 1989).

Taulukko 1. Suolamäärät talvikautena 1989-90 (loka-huhtikuu) kg/km ja kg/m². (K=kontrollitie, S=suolattu tie, KS=kostutettu suolaus)

KOEALA	KÄYTETTY SUOLAMÄÄRÄ (NaCl)	
	kg/km	g/m ²
PUUTOSSALMENTIE (K)	3.5	0.5
MELALAHDENTIE (K)	300.0	4.0
KARTTULANTIE (S)	8400.0	1100.0
MAANINGANTIE (S)	6800.0	950.0
SIILINJÄRVI VT 5 (S)	16200.0	2200.0
KUOPIO VT 5 (KS)	16200.0 (375 CaCl ₂)	2200.0 (52 CaCl ₂)



Kuva 1. Tutkimukseen valitut tiet ja niiden varrella sijaitsevat koealat.

Taulukko 2. Koealojen liikennemäärät, autoa/vuorokausi ja raskaan liikenteen osuus kokonaisliikennemäärästä (%) vuonna 1989 (TVH/Tierekisteri, 1989). (K=kontrollitie, S=suolattu tie, KS=kostutettu suolaus)

KOEALA	KOK.LIIKENNE	RASKAS LIIKENNE %
PUUTOSSALMENTIE (K)	700	7.1
MELALAHDENTIE (K)	1700	9.4
KARTTULANTIE (S)	1600	6.3
MAANINGANTIE (S)	2100	9.5
SIILINJÄRVI VT 5 (S)	6500	16.9
KUOPIO VT 5 (KS)	8100	11.0

Kevättalvi 1990 (helmi-huhtikuu) oli poikkeuksellisen lämmin ja sateinen. Myös tammikuu oli normaalia selvästi sateisempi, mutta keskilämpötilaltaan normaali. Taulukossa 3 on esitetty kuukausien keskilämpötilat ja sademäärät talvella 1989-1990 sekä pitkäaikaiset keskiarvot vastaavilta kuukausilta (Ilmatieteen laitos, suullinen tieto).

Taulukko 3. Talvikauden 1989-1990 kuukausien keskimääräiset lämpötilat (C°) ja sademäärät (mm) sekä vastaavat pitkäaikaikeskiarvot vuosilta 1931-1960 (Ilmatieteen laitos, suullinen tieto).

KUUKAUSI	LÄMPÖTILA (C°)		SADEMÄÄRÄ (mm)	
	1989-1990	PITKÄAIK.	1989-1990	PITKÄAIK.
1989 LOKAKUU	+3.6	+3.6	39	54
MARRASKUU	-1.0	-1.4	38	37
JOULUKUU	-8.1	-6.1	37	32
1990 TAMMIKUU	-10.2	-9.8	71	32
HELMIKUU	-0.1	-10.0	65	23
MAALISKUU	-1.8	-6.1	50	22
HUHTIKUU	+3.9	+1.1	45	26
TOUKOKUU	+8.9	+7.9	11	38

3.1.2 Käytetyt menetelmät

Kokeellisessa osassa tutkittiin eri suolaustapojen ja -määrien vaikutusta tienvarren mäntyihin kolmella kuivasuolatulla (NaCl), yhdellä kosteasuolatulla (NaCl ja CaCl_2) ja kahdella hyvin vähän suolatulla tiellä (kontrollitiet). Puutossalmen ja Melalahdentien koealat valittiin kontrollialoiksi (K) niiden vähäisen suolaamisen vuoksi. Mainittakoon, että Puutossalmen tielle suola on levitetty suolahiekkana: 15 kg NaCl /1 m³ hiekkaa. Tutkimuksessa verrattiin myös valtatie 5:n koealojen erilaisten suolaustapojen vaikutuksia keskenään: pohjoispuolella käytetään kuivaa NaCl -suolausta (S) ja eteläpuolella 23 % CaCl_2 -liuoksella kostutettua NaCl suolausta (KS). Viimeiset suolauspäivät ennen kutakin näytteenottoa on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Viimeiset suolauspäivät ennen näytteenottoa eri koealoilla.

KOEALA	NÄYTTEENOTTOPÄIVÄ		
	24.2.1990	31.3.1990	5.5.1990
VIIMEINEN SUOLAUSPÄIVÄ ENNEN NÄYTTEENOTTOA			
PUU (K)	21.2	-	-
MELA (K)*	-	-	-
KAR (S)	22.2.	25.3	7.4.
MAA (S)	22.2	25.3	6.4.
VT 5:SII (S)			
JA KUO (KS)	23.2	30.3	10.4

*=Tietä suolattu ainoastaan syystalvella 1989.

Kunkin tien varrelta valittiin tutkimukseen viisi puuta, iältään 10-25 vuotiaita, 5-10 metrin päästä tien reunasta. Kahdella koealoista, Puutossalmentiellä (K) ja Karttulantiellä (S), pyrittiin selvittämään etäisyyden vaikutusta puiden suolapitoisuuksiin ja kalvovaurioiden syntyyn ja sieltä otettiin neulasnäytteet myös kauempaa tien varresta noin 15-20 metrin etäisyydeltä (ns. gradienttinäytteet, G). Näytteet kerättiin puun tien puoleisilta oksilta 1,5-2 metrin korkeudelta; 5 -tien varrella sijainneiden

koealojen puista jopa 2,5 metrin korkeudelta, koska alaoksat olivat kuolleet.

Koepuista haettiin neulasnäytteet kolme kertaa kevään 1990 aikana 24. helmikuuta, 31. maaliskuuta ja 5. toukokuuta. Neulasista kirjattiin ensimmäisen vuosikerran ulkoiset oireet sekä analysoitiin neulasten solukalvojen vuotoa johtokyky- ja kaliumionin vuotomittauksella. Kolmesta puusta koealaltaan otettiin lisäksi näytteet 24. helmikuuta ja 5. toukokuuta natriumin (Na), kalsiumin (Ca) ja kloridin (Cl) määrittystä varten. Alkuainemääritykset ja johtokykymittaus tehtiin sekä tislattulla vedellä pestyistä että pesemättömistä neulasista, jotta nähtäisiin mikä on neulasen pinnalla olevien epäpuhtauksien osuus. Kaliumionivuotoa varten otettuja näytteitä ei pesty, koska neulasen pinnalla ei juurikaan ole ulkopuolelta tullutta kaliumia, vaan kalium on pääosin peräisin kasvisoluista.

3.1.3 Kaliumionivuodon mittaus

Kaliumvuodon mittaus on spesifinen mittausmenetelmä, joka on osoittautunut käyttökelpoiseksi tutkittaessa kasvien solukalvojen vaurioitumista erilaisten ympäristöstressien (mm. rikkidioksidi, otsoni, kylmäältistus) vaikutuksesta. Kaliumvuoto on hyvä indikaattori solukalvovaurioista, sillä se on pääasiallinen soluista ulos vuotava ioni ja ympäristöstressien vaikutuksesta vuodon on todettu lisääntyneen. Vuotoon vaikuttavat kasvin herkkyyys, altistumisaika ja -määrä (Puckett ym. 1977, Elkiey ja Ormrod 1979, Puckacki ja Puckacka 1987).

Kustakin puusta kerättiin maastossa kahteen lasiputkeen (rinnakkaiset näytteet) 3-4 neulasta (noin 50 mg). Laboratoriossa neulasten päälle pipetoitiin 10 ml tislattua vettä, putkia ravisteltiin 30 minuuttia ja annettiin seistä kylmähuoneessa (noin +6°C) 24 h. Seuraavana päivänä neulaset otettiin pois, kuivattiin 60°C 24 tunnin ajan ja punnittiin kuivapaino. Veden kaliumpitoisuus

määritettiin atomiabsorptiospektrofotometrillä (Perkin-Elmer 460) liekkimenetelmää käyttäen. Tulokset kaliumvuodon määrästä ilmoitettiin mg K/g kuivapainoa kohti.

3.1.4 Johtokykymittaus (konduktiviteettimittaus)

Kasvisolujen vaurioitumisen määrittämiseen käytetään myös johtokyvyn mittaamista liuoksesta, johon elektrolyytit ovat vuotaneet vaurioituneista soluista (Dexter ym. 1930, 1932). Menetelmässä mitataan epäspesifisesti kaikkien solusta vuotaneiden ionien määrä. Johtokyvyn mittaus on yleisemmin käytetty solukalvovaurioiden mittaamenetelmä kuin kaliumvuodon mittaus, sillä se on halvempi ja yksinkertaisempi toteuttaa. Johtokykytestiä on käytetty erilaisten ympäristöstressien kasvivaikutustutkimuksissa (esim. Smit-Spinks ym. 1983, Keller 1985). Vaurioituneen kuusen (Picea abies) kaliumvuodon ja liuoksen johtokyvyn välillä on havaittu selvä lineaarinen korrelaatio (Pukacki ja Pukacka 1987).

Maastossa kustakin puusta kerättiin neljään lasiputkeen 10-12 neulasta (noin 200 mg). Puolet näytteistä (2 putkellista/puu) pestiin pintakontaminaation selvittämiseksi. Neulaset pestiin putkessa kahteen kertaan sekoittamalla Vortexilla 30 sekuntia 10 ml:ssa tislattua vettä. Tämän jälkeen neulasten päälle pipetoitiin 7 ml tislattua vettä, ravisteltiin 30 min, siirrettiin kylmähuoneeseen (n. +6°C) ja annettiin ionien vuotaa 24 tuntia. 24 tunnin kuluttua liuoksen johtokyky mitattiin Philipsin johtokykymittarilla PW 9505 läpivirtauskennon avulla. Tulokset on ilmoitettu mikroSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

3.1.5 Natrium-, kalsium-, ja kloridipitoisuuksien määrittäminen

Neulasnäytteet kerättiin alkuainemäärityksiä varten kultakin koealalta kolmesta puusta noin 1.5 metrin korkeudelta tien puoleisista oksista. Puolet neulasmateriaalista pestiin pintakontaminaation selvittämiseksi kahteen kertaan sekoittamalla neulasia

250 ml:ssa tislattua vettä 30 sekunnin ajan. Neulaset kuivattiin paperipusseissa (60°C, 24 h), jonka jälkeen kuivatut neulaset jauhettiin analyysimyllyllä (Janke & Kunkel) ja jauhe säilöttiin tiiviiseen muovipurkkiin.

Analyysiä varten 0.5 g neulasjauhetta punnittiin 100 ml:aan laimeaa typpihappoliuosta (7.6 ml analyysipuhdasta HNO_3 /1000 ml tislattua vettä). Näytteitä ravisteltiin 4 tuntia ja annettiin uuttua yön yli. Näytteet suodatettiin imulla Büchner-suppilon kautta, suodatinpaperina Schleicher & Schuellin 589³ ja liuoksesta analysoitiin natrium- ja kalsiumpitoisuus atomiabsorptiospektrofotometrillä (Perkin-Elmer 460) liekkimenetelmää käyttäen (esim. Hofstra ja Hall 1971).

Kloridipitoisuuden määrittystä varten kuivattua neulasjauhetta punnittiin 0.25 g 100 ml:aan tislattua vettä. Tämän jälkeen näytettä pidettiin 30 minuuttia ultraäänihauteessa kloridin liuottamiseksi. Liuoksesta analysoitiin kloridipitoisuus ionikromatografilla (Dionex 2010i).

3.1.6 Ulkoisten oireiden kuvaus

Näyteoksien neulasten kunto luokiteltiin niiden ulkonäön perusteella neljään luokkaan. Vaurioluokat ja niiden oirekuvaukset on esitetty taulukossa 5.

3.2 Pölynsidontasuolaus (kesäsuolaus)

3.2.1 Koealojen kuvaus

Tutkimukseen valittiin koealat kahden CaCl_2 :lla suolatun soratien varrelta ja kahden täysin suolaamattoman tien varrelta, viisi puuta kultakin. Koealat sijaitsivat MT 551 ja MT 549 yhdistävän

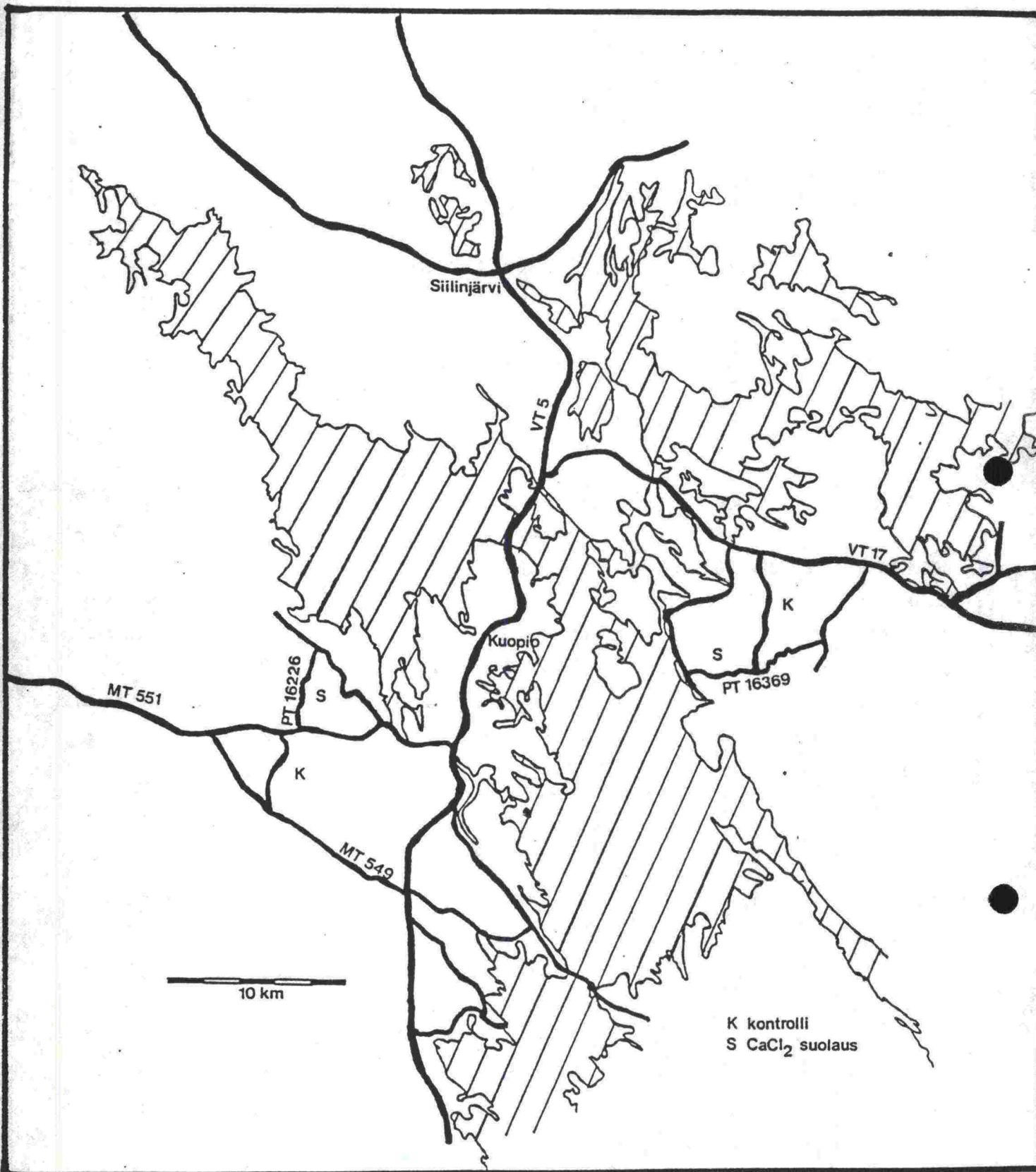
Taulukko 5. Neulasten vaurioluokat ja oirekuvaukset.

Vaurioluokka	Oireiden kuvaus
0 = terve	ei näkyviä vaurioita
1 = lievästi vaurioitunut	lievää neulasten ruskistumista (0-20 %), ei neulaskatoa
2 = selvästi vaurioitunut	neulasten ja neulasten kärkien ruskistumista (20-50%), hieman neulaskatoa
3 = pahoin vaurioitunut	ruskistuneita neulasia runsaasti (>50%), selvä neulaskato

soratien varrella (KONTROLLI 1), paikallistie PT 16226 varrella (SUOLATTU 1), VT 17 ja PT 16369 yhdistävän tien varrella (KONTROLLI 2) ja Pt 16369 varrella (SUOLATTU 2). Koealat on esitetty kuvassa 2. Pt 16226 oli suolattu 26. toukokuuta kertasuolauksena 8 t CaCl_2/km ja Pt 16369 vastaavasti 18. toukokuuta 10 t/km (tiedot saatu Kuopion Tiemestaripiiristä). Teiden liikennemäärät olivat Pt 16226:lla 149 autoa vuorokaudessa (raskaan liikenteen osuus 8 %) ja Pt 16369:lla 80 autoa vuorokaudessa (6.3 %) (TVH/Tierekisteri, 1989).

3.2.2 Käytetyt menetelmät

Kultakin koealalta valittiin viisi puuta, joiden ulkoisia oireita seurattiin kaksi kertaa kesän aikana, 11. kesäkuuta ja 30. heinäkuuta. Näytteet johtokyky-, kaliumionivuoto- ja alkuainemäärityksiä varten haettiin kasvukauden loppupuolella, 30. heinäkuuta. Näytteet otettiin 5-10 metrin päästä tien reunasta, tien puolelta puuta, 1.5-2 metrin korkeudelta. Näytteet käsiteltiin ja analysoitiin kuten talvisuolausnäytteetkin.



Kuva 2. Pölynsidontasuolaustutkimukseen valitut tiet ja niillä sijaitsevat koealat.

3.3 Tulosten tilastollinen käsittely

Analyysituloksia eri paikkojen välillä verrattiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä (Oneway, Tukeyn testi eli HSD -testi, engl.honestly significant difference). Etäisyysvaikutuksen tuloksia verrattiin varianssianalyysin (Anova) avulla. Pestyjen ja pesemättömien sekä eri aikoina otettujen näytteiden tuloksia verrattiin parittaisen t-testin avulla.

4 TULOKSET

4.1 Talvisuolaus: eri koealojen välinen vertailu

4.1.1 Kaliumionivuoto

Helmikuussa otettujen neulasnäytteiden kaliumvuoto soluista vaihteli Puutossalmentien kontrollialan 0.03 mg/g ja Karttulantien (S) 0.12 mg/g välillä. Kaikkien suolattujen teiden tulokset poikkesivat merkitsevästi Puutossalmentien kontrollialueesta (kuva 3).

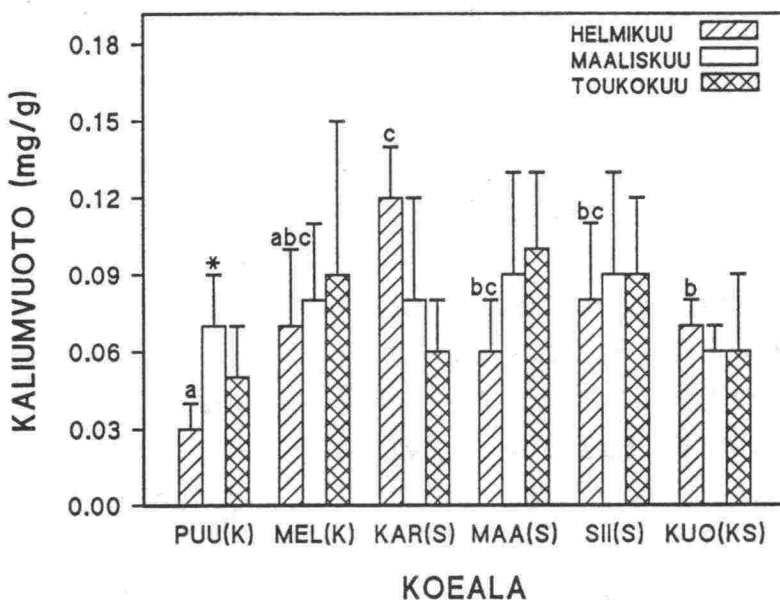
Maaliskuun näytteiden tulokset olivat hyvin tasaiset, eikä selviä eroja ollut (kuva 3).

Toukokuussa suurin kaliumvuoto oli Maaningantien näytteessä 0.10 mg/g k-a. ja pienin Puutossalmentien kontrollialalla 0.05 mg/g k-a. Suolattujen teiden varsilta otetuissa näytteissä kaliumvuoto oli hieman suurempi kuin kontrollialoilla, mutta tilastollisesti merkitseviä eroja ei ollut (kuva 3).

Kun eri aikoina otettujen näytteiden tuloksia verrattiin keskenään, merkitseviä eroja oli ainoastaan Puutossalmentien kontrollialalla, muutoin kaliumionivuoto ei muuttunut merkitsevästi kevään kuluessa (kuva 3).

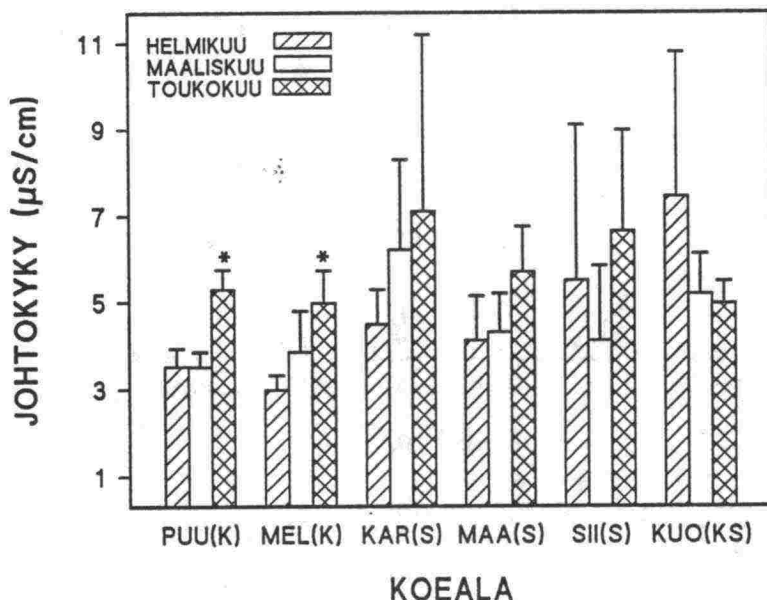
4.1.2 Johtokyky

Yhteenveto pestyjen neulasten johtokykytuloksista on esitetty kuvassa 4. Tuloksista ilmenee, että johtokyky oli suurempi suolattujen teiden varsilla, mutta erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Johtokykymittaukset tehtiin aina myös pesemättömistä neulasista, mutta tulokset olivat samansuuntaisia, joten tässä esitellään ainoastaan pestyjen neulasten tulokset.



Kuva 3. Neulasten kaliumvuoto (mg/g kuiva-ainetta) helmi-, maaliskuu- ja toukokuussa eri koealoilla. Samalla kirjaimella merkityt saman ajankohdan tulokset eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Oneway, Tukeyn testi, $p < 0.05$). Tähdellä merkitty eroaa saman koealan muista tuloksista tilastollisesti merkitsevästi (parittainen t-testi, $p < 0.05$).

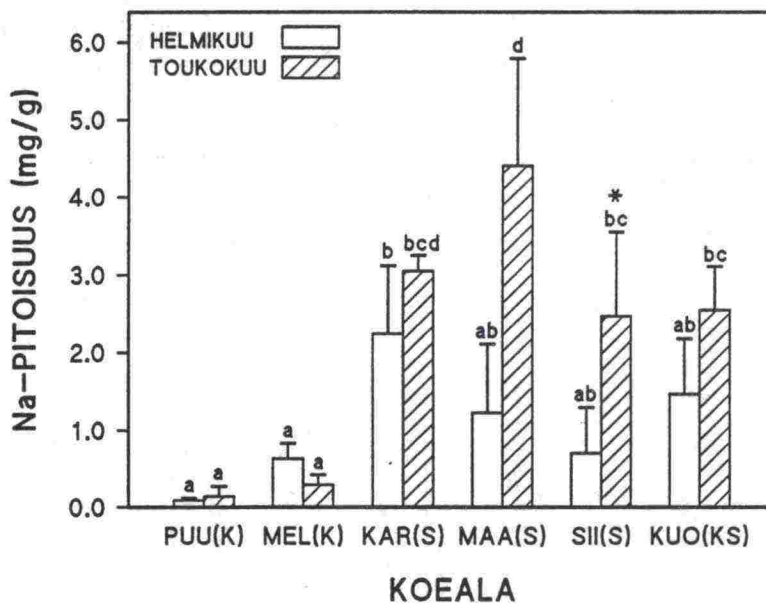
Johtokykyarvot kohosivat kevään mittaan Puutossalmen-, Melalahden-Karttulan- ja Maaningantien koealoilla, mutta tilastollisesti merkitsevästi ne kohosivat helmikuusta toukokuuhun ainoastaan kontrollialoilla.



Kuva 4. Pestyjen neulasten johtokyky (µS/cm) helmi-, maaliskuu- ja toukokuussa eri koealoilla. Tähdellä merkityt eroavat saman koealan muista tuloksista tilastollisesti merkitsevästi (parittainen t-testi, $p < 0.05$).

4.1.3 Natriumpitoisuus

Pestyjen neulasten natriumpitoisuudet olivat aina suuremmat suolattujen teiden koealoilla kuin kontrollialoilla (kuva 5.). Selvimmin erot tulivat esille toukokuussa, jolloin kaikki suolattujen teiden näytteet poikkesivat tilastollisesti merkitsevästi kontrollialoista. Maaningantien koealalla oli jopa 30 kertaa suurempi natriumpitoisuus (3.05 mg/g kuiva-ainetta) kuin Puutossalmentien kontrollialalla (0.14 mg/g kuiva-ainetta). Helmikuussa suurin ero oli Puutossalmentien (0.09 mg/g) ja Karttulantien (2.24 mg/g) koealojen välillä, noin 25 -kertainen.



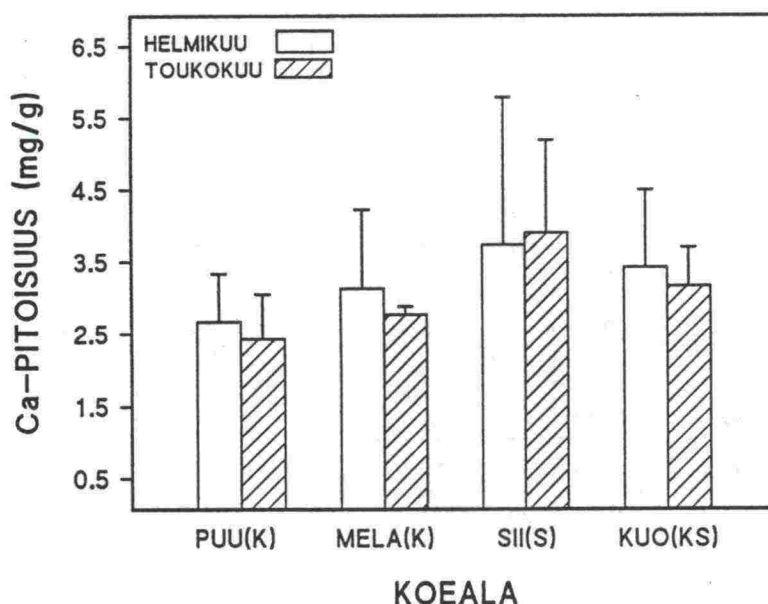
Kuva 5. Pestyjen neulasten natriumpitoisuudet (mg/g kuiva-ainetta) helmi- ja toukokuussa eri koealoilla. Samalla kirjaimella merkityt saman ajankohdan tulokset eivät eroa eri paikoilla toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Oneway, Tukeyn testi, $p < 0.05$). Tähdellä merkityt eroavat saman koealan tuloksesta tilastollisesti merkitsevästi (parittainen t-testi, $p < 0.05$).

Pitoisuudet kasvoivat kaikkien suolattujen teiden varsilta otetuissa näytteissä kevään kuluessa, mutta tilastollisesti merkitsevästi ne kohosivat ainoastaan VT 5 Siilinjärven pohjoispuolen ja Maaningantien näytteiden kohdalla.

Tislatulla vedellä pestyjen ja pesemättömien neulasnäytteiden välillä ei ollut merkitseviä eroja natriumpitoisuuksissa.

4.1.4 Kalsiumpitoisuus

Kalsiumpitoisuus määritettiin kontrollialojen ohella ainoastaan 5 tien varrella olevista koealoista, koska ainoastaan Kuopion eteläpuolella valtatie 5:lla käytettiin CaCl_2 :a suolan kostutukseen. Neulasten kalsiumpitoisuudet olivat molemmilla valtatie 5:n koealoilla ja kontrollialoilla hyvin tasaiset (kuva 6). Tilastollisia eroja pestyjen ja pesemättömien ja toisaalta eri aikoina otettujen näytteiden välillä ei ollut.

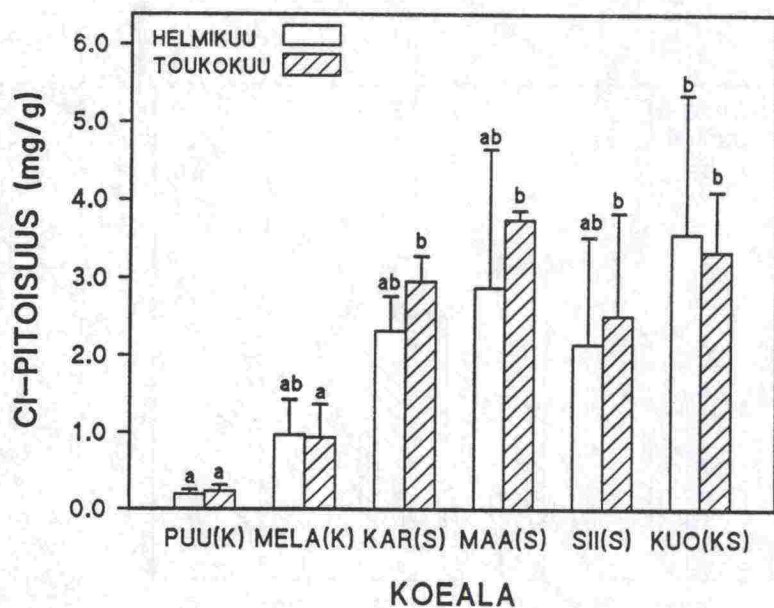


Kuva 6. Pestyjen neulasten kalsiumpitoisuudet (mg/g kuiva-ainetta) helmi- ja toukokuussa eri koealoilla.

4.1.5 Kloridipitoisuus

Pestyjen neulasten kloridipitoisuudet olivat helmikuussa vain paikoitellen kohonneita suolattujen teiden varsilla kontrollialoihin verrattuna. Kontrollialojen pitoisuuksista poikkesi tilastollisesti merkitsevästi Karttulantien (2.32 mg/g) ja VT 5 Kuopion eteläpuolen koeala (3.57 mg/g). Suurin ero Puutossalmen kontrollitiehen (0.18 mg/g) oli noin 20 -kertainen. Toukokuussa kaikkien suolattujen teiden neulasten kloridipitoisuudet poikkesivat merkitsevästi kontrollialoista. Suurin ero oli Maaningantien (3.75 mg/g) ja Puutossalmen kontrollitien (0.24 mg/g) välillä, noin 15 -kertainen (kuva 7).

Pitoisuudet kasvoivat yleensä jonkin verran kevään kuluessa suolattujen teiden varsilla. Erot eivät kuitenkaan olleet merkitseviä.



Kuva 7. Pestyjen neulasten kloridipitoisuudet (mg/g kuiva-ainetta) helmi- ja toukokuussa eri koealoilla. Samalla kirjaimella merkityt saman ajankohdan tulokset eivät eroa eri koealoilla toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Oneway, Tukeyn testi, $p < 0.05$).

4.1.6 Ulkoiset oireet

Kontrollialueiden ensimmäisen vuosikerran neulaset olivat lähes kokonaan vailla ulkoisia oireita kaikilla tarkastelukerroilla; kummallakin kontrollialla moodi (Mo) eli yleisin luokka oli 0. Suolattujen teiden varsilla sen sijaan oli enemmän oireita, lähinnä neulasten ruskistumia ja kellastumia sekä neulaskatoa. Osa oireista voidaan selittää tuholaisten aikaansaannoksiksi, esimerkiksi valtatie 5 ja Maaningantien varrella olleissa koepuissa oli männynneulaskoin (Ocnerostoma piniariella Zell.) aiheuttamia kuolleita neulasia. Oireiden luokittelu puittain on esitetty taulukossa 5.

Tässä tarkastelussa keskityttiin pelkästään uusimman vuosikerran neulasiin. Suolattujen teiden varsilla näkyviä oireita havaittiin kuitenkin vielä runsaammin toisen vuoden neulasissa.

Taulukkoon 6 on koottu yhteenveto natriumin, kloridin ja kalsiumin pitoisuuksista ja ulkoisista oireista yhdessä tutkittujen teiden suolausmäärien kanssa ja taulukkoon 7 on koottu ulkomaisten tutkimusten vastaavia pitoisuuksia suolattujen teiden varsilla sekä taustapitoisuuksia eri puulajeilla.

Taulukko 5. Koepuiden ulkoisten oireiden kuvaus ja oireiden luokittelu eri koealoilla helmi-, maaliskuu- ja toukokuussa. (0=terve, 1=lievästi vaurioitunut, 2=selvästi vaurioitunut, 3=pahoin vaurioitunut, Mo=moodi=yleisin luokka)

OIRELUOKKA						
koeala	puu nro	helmikuu	maaliskuu	toukokuu	muuta	
PUU (K)	1	0	0	0		
	2	1	1	1		
	3	0	0	0		
	4	0	0	0		
	5	0 Mo=0	0 Mo=0	0 Mo=0		
PUU (K) GRADIENTTI	1	0	0	0		
	2	0	0	0		
	3	0	0	0		
	4	0	0	0		
	5	0 Mo=0	0 Mo=0	0 Mo=0		
MELA (K)	1	0	0	0		
	2	1	1	1		
	3	0	0	0		
	4	0	0	0		
	5	0 Mo=0	0 Mo=0	0 Mo=0		
KAR (S)	1	1	1	1	punarusk. kärkiä	
	2	1	1	2	- II -	
	3	1	2	2	punarusk.neul.	
	4	1	2	2		
	5	0 Mo=1	2 Mo=2	2 Mo=2	punarusk.kärkiä	
KAR (S) GRADIENTTI	1	0	0	0		
	2	0	0	0		
	3	0	0	0		
	4	0	0	0		
	5	0 Mo=0	0 Mo=0	0 Mo=0		
MAA (S)	1	0	1	2		
	2	0	0	0	punarusk.neul.	
	3	1	2	2	männynneulas-koi	
	4	1	1	1		
	5	0 Mo=0	1 Mo=1	1 Mo=1,2		
SII (S)	1	0	1	1	punarusk.neul.	
	2	0	1	1		
	3	0	0	0		
	4	1	1	2		
	5	1 Mo=0	1 Mo=1	2 Mo=1,2		
KUO (KS)	1	2	2	2	männynneulas-koi	
	2	0	1	2		
	3	0	1	1		
	4	1	1	1		
	5	1 Mo=0,1	1 Mo=1	1 Mo=1	männynneulas-koi	

Taulukko 6. Tutkittujen teiden liikennemäärät vuonna 1989 (autoa/vuorokausi) niiden suolausmäärät (kg/km) sekä pestyjen neulasten keskimääräiset natrium-, kloridi- ja kalsiumpitoisuudet (mg/g) ja vastaavien koepuiden oireiden moodit (-yleisin luokka). (Oireluokitus sivulla 37).

KOEALA	LIIKENNEM.	SUOLAUS	PESTYJEN NEULASTEN ALKUAINEPITOISUUDET (mg/g)						OIREET
	v. 1989	V.1989-90	HELMIKUU			TOUKOKUU			
	autoa/vrk)	kg/km	Na	Cl	Ca	Na	Cl	Ca	
Puutossalmentie (K)	700	3.5	0.09	0.18	2.67	0.14	0.24	2.43	0
Melalahdentie (K)	1700	300	0.63	0.97	3.13	0.29	0.94	2.77	0
Karttulantie (S)	1600	8500	2.24	2.32	—	3.05	2.96	—	2
Maaningantie (S)	2100	6800	1.23	2.88	—	4.41	3.75	—	1,2
Siilinjärvi VT 5 (S)	6500	16200	0.7	2.15	3.74	2.47	2.52	3.91	1,2
Kuopio VT 5 (KS)	8100	16200	1.47	3.57	3.42	2.55	3.34	3.16	1
		(CaCl2 375)							

Taulukko 7. Yhteenveto eri puulajien lehtien/neulasten natrium- ja kloridipitoisuuksista suolattujen teiden varsilla, kun näkyviä oireita on ilmennyt ja vastaavat natriumin, kloridin ja kalsiumin taustapitoisuudet (mg/g).

PUULAJI	PITOISUUS (mg/g), JOLLOIN OIREITA HAVAITTU		TAUSTAPITOISUUS (mg/g)			VIITE
	Na	Cl	Na	Cl	Ca	
SOKERIVAAHTERA (Acer saccharum)	0.009	4	0.006	0.5	0.5	Holmes ja Baker 1965
TAVALL. MÄNTY (Pinus sylvestris)	6	7.6	—	—	—	Hofstra ja Hall 1971
MÄNTY*	1.1	1.64	0.036	0.054	—	Menlove 1973
PONDEROSAMÄNTY (Pinus ponderosa)	14.4	33.2	0.07	0.5	2.4	Spotts ym. 1972
KUUSI (Picea abies)	—	—	0.004	0.38	8.3	Wytttenbach ym. 1988
	—	—	—	0.4	—	Wytttenbach ja Tobler 1988
	—	—	—	—	—	Behm ja Kessler 1971
STROBUSMÄNTY (Pinus strobus)	—	—	—	5	—	Smith 1970

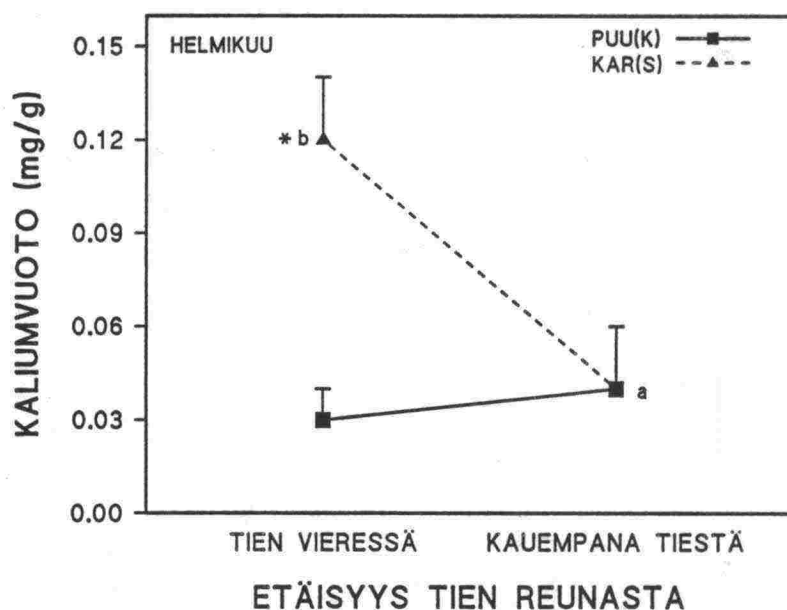
* mäntylajia ei ilmoitettu

4.2 Talvisuolaus: etäisyyden vaikutus

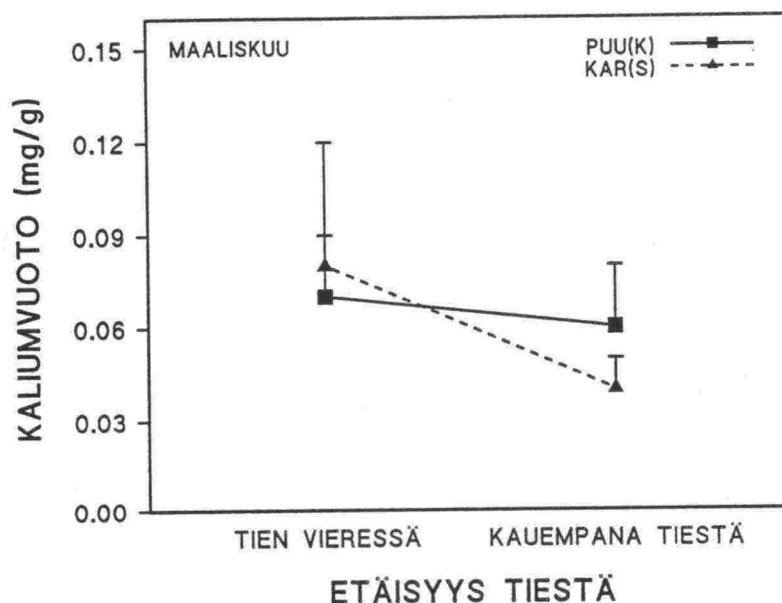
4.2.1 Kaliumionivuoto

Kaliumin vuoto soluista väheni etäisyyden kasvaessa tien reunasta sekä kontrollitien että suolatun tien varrella. Merkitsevästi tulos poikkesi kuitenkin ainoastaan helmikuussa otetuissa näytteissä, jolloin suolatun tien varrella pitoisuus pieneni selvästi tien varrella olevaan verrattuna. Kontrollialueella gradienttipisteen ja tienvarren pitoisuuksissa ei ollut eroja. Tulokset on esitetty kuvissa 8-10.

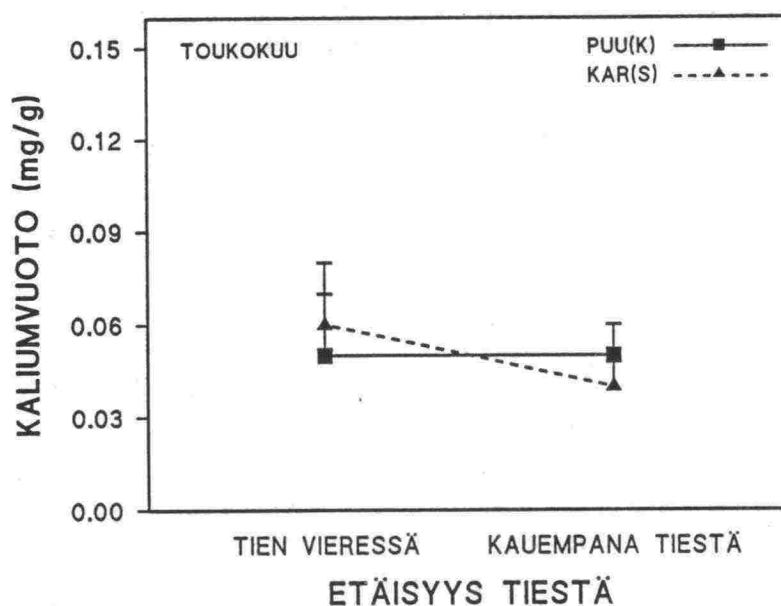
Kaliumionivuoto soluista ei kasvanut aikavertailussa gradienttipisteissä.



Kuva 8. Neulasten kaliumvuoto (mg/g kuiva-ainetta) helmikuussa suolatun ja kontrollitien varrella eri etäisyyksillä tiestä (tien vieressä = 7-11 metrin etäisyydellä tien reunasta, kauempana tiestä = 15-20 metrin etäisyydellä tien reunasta). Eri kirjaimella merkityt saman koealan tulokset eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Anova, $p < 0.05$). Tähdellä merkitty eroa vastaavasta kontrollialasta tilastollisesti merkitsevästi (Oneway, Tukeyn testi, $p < 0.05$).



Kuva 9. Neulasten kaliumvuoto (mg/g kuiva-ainetta) maaliskuussa suolatun ja kontrollitien varrella eri etäisyyksillä tiestä (tien vieressä = 7-11 metrin etäisyydellä tien reunasta, kauempana tiestä = 15-20 metrin etäisyydellä tien reunasta).



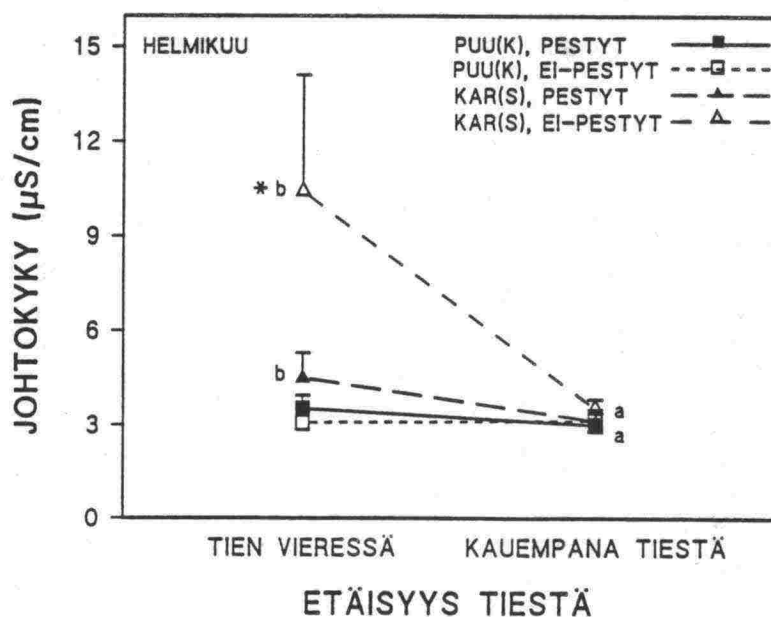
Kuva 10. Neulasten kaliumvuoto (mg/g kuiva-ainetta) toukokuussa suolatun ja kontrollitien varrella eri etäisyyksillä tiestä (tien vieressä = 7-11 metrin etäisyydellä tien reunasta, kauempana tiestä = 15-20 metrin etäisyydellä tien reunasta).

4.2.2 Johtokykymittaus

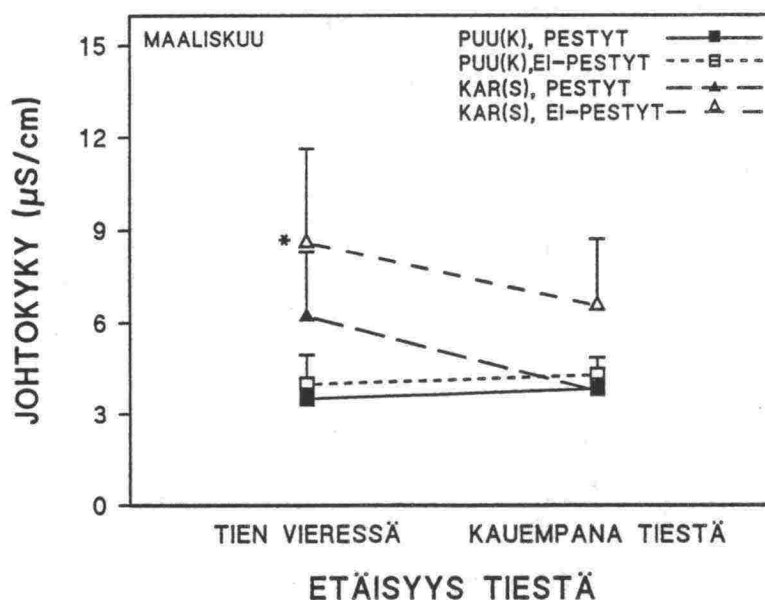
Helmi- ja maaliskuussa suolatun tien varrella sekä pestyissä että pesemättömissä näytteissä johtokyky oli tilastollisesti merkitsevästi pienempi kauempana tienvarrella. Kontrollialueella ei vastaavaa eroa ollut. Helmikuussa suolatun tien pesemättömien neulasten johtokyky oli merkitsevästi suurempi kuin vastaavan kontrollialan. Kontrollialueella ja suolatun tien gradienttialalla sekä pestyjen että pesemättömien näytteiden johtokyky kasvoi aikavertailussa jonkin verran (kuvat 11-13).

4.2.3 Natriumpitoisuus

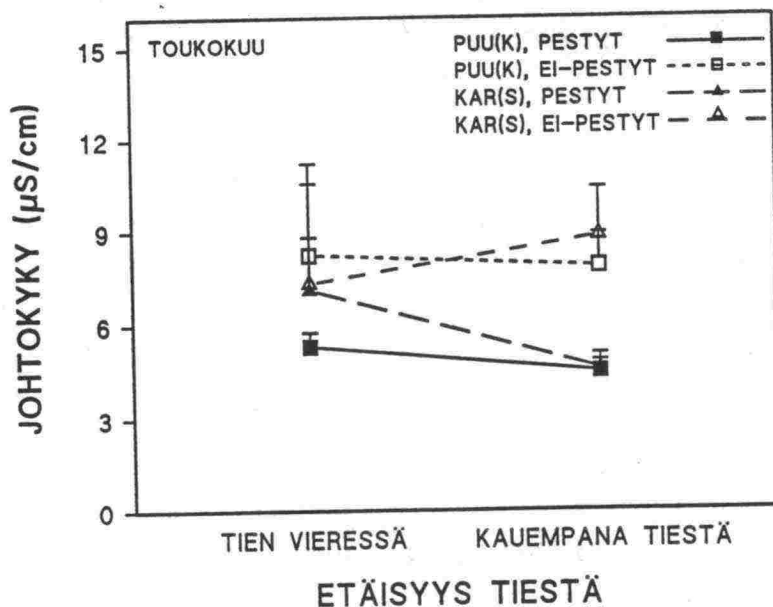
Pestyjen neulasten natriumpitoisuus pieneni molemmilla näytteenottokerroilla suolatun tien varrella selvästi etäisyyden tien reunasta kasvaessa. Kontrollialueella ei vastaavaa eroa ollut. Pestyjen ja pesemättömien välillä ei ollut eroja. Myöskään aikavertailussa ei eroja ollut. Tulokset on esitetty kuvassa 14.



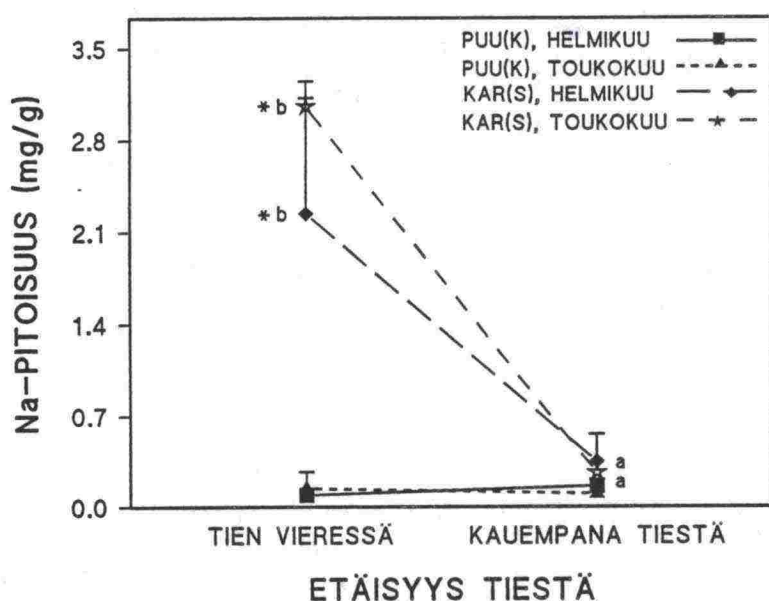
Kuva 11. Pestyjen ja pesemättömien neulasten johtokyky ($\mu\text{S}/\text{cm}$) helmikuussa suolatun ja kontrollitien varrella eri etäisyyksillä tiestä (tien vieressä = 7-11 metrin etäisyydellä tien reunasta, kauempana tiestä = 15-20 metrin etäisyydellä tien reunasta). Eri kirjaimella merkityt saman koealan tulokset eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Anova, $p < 0.05$). Tähdellä merkitty eroaa vastaavasta kontrollista tilastollisesti merkitsevästi (Oneway, Tukeyn testi, $p < 0.05$).



Kuva 12. Pestyjen ja pesemättömien neulasten johtokyky ($\mu\text{S}/\text{cm}$) maaliskuussa suolatun ja kontrollitien varrella eri etäisyyksillä tiestä (tien vieressä = 7-11 metrin etäisyydellä tien reunasta, kauempana tiestä = 15-20 metrin etäisyydellä). Tähdellä merkitty eroaa vastaavasta kontrollista tilastollisesti merkitsevästi (Oneway, Tukeyn testi, $p < 0.05$).



Kuva 13. Pestyjen ja pesemättömien neulasten johtokyky ($\mu\text{S}/\text{cm}$) toukokuussa suolatun ja kontrollitien varrella eri etäisyyksillä tiestä (tien vieressä = 7-11 metrin etäisyydellä tien reunasta, kauempana tiestä = 15-20 metrin etäisyydellä tien reunasta).



Kuva 14. Pestyjen neulasten natriumpitoisuus (mg/g kuiva-ainetta) helmi- ja toukokuussa suolatun ja kontrollitien varrella eri etäisyyksillä tiestä (tien vieressä = 7-11 metrin etäisyydellä tien reunasta, kauempana tiestä = 15-20 metrin etäisyydellä tien reunasta). Eri kirjaimella merkityt saman koealan tulokset eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Anova, $p < 0.05$). Tähdellä merkityt eroavat vastaavasta kontrollista tilastollisesti merkitsevästi (Oneway, Tukeyn testi, $p < 0.05$).

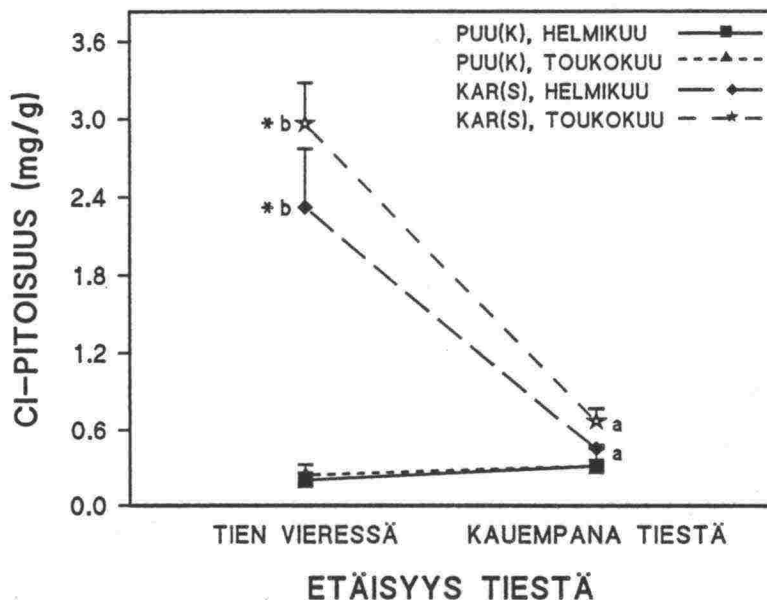
4.2.4 Kloridipitoisuus

Kun etäisyys kasvoi, pieneni suolatun tien varrella pestyjen neulasten kloridipitoisuus selvästi kontrollialueeseen verrattuna. Aikavertailussa pitoisuudet eivät muuttuneet merkitsevästi. Tulokset on esitetty kuvassa 15.

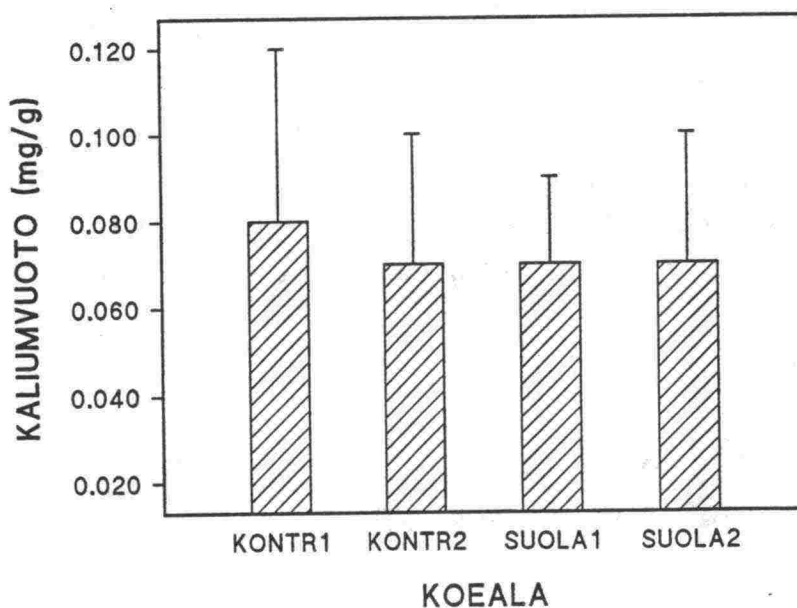
4.3 Kesäsuolaus

4.3.1 Kaliumionivuoto ja johtokykymittaus

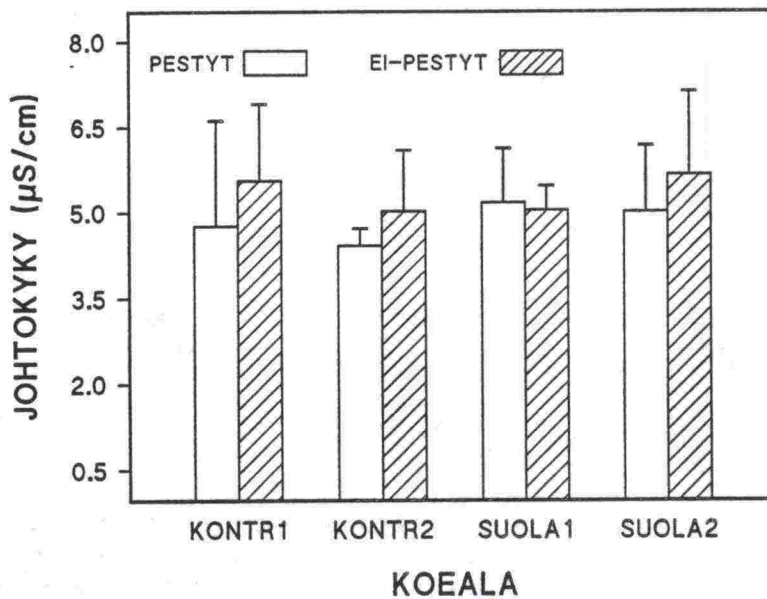
Kaliumionivuoto ja johtokyky eri koealoilla oli hyvin tasainen (kuvat 16 ja 17), eikä tilastollisesti merkitseviä eroja ollut eri suolauskäsittelyjen välillä.



Kuva 15. Pestyjen neulasten kloridipitoisuus (mg/g kuiva-ainetta) helmi- ja toukokuussa suolatun ja kontrollitien varrella eri etäisyyksillä tiestä (tien vieressä = 7-11 metrin etäisyydellä tien reunasta, kauempana tiestä = 15-20 metrin etäisyydellä tien reunasta). Eri kirjaimella merkityt saman koealan tulokset eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Anova, $p < 0.05$). Tähdellä merkityt eroavat vastaavasta kontrollista tilastollisesti merkitsevästi (Oneway, Tukeyn testi, $p < 0.05$).



Kuva 16. Neulasten kaliumvuoto (mg/g kuiva-ainetta) suolatuilla ja kontrolliteillä heinäkuussa 1990.



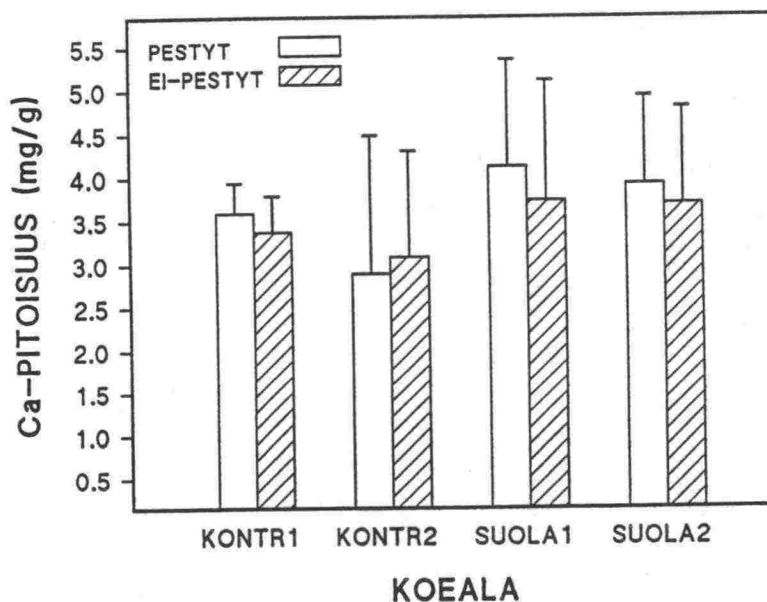
Kuva 17. Pestyjen ja pesemättömien neulasten johtokyky (uS/cm) suolatuilla ja kontrolliteillä heinäkuussa 1990.

4.3.2 Kalsium- ja kloridipitoisuus

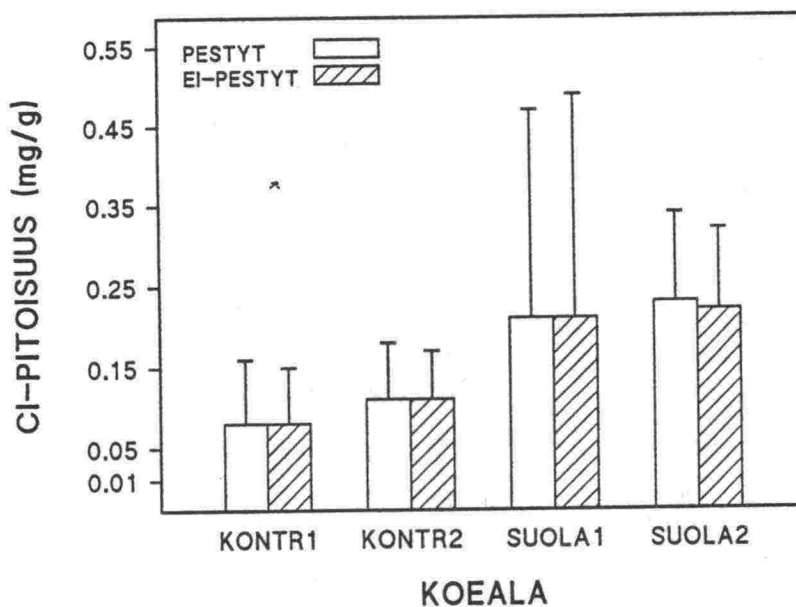
Neulasten kalsium- ja kloridipitoisuuksissa eri koealoilla ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja (kuvat 18 ja 19). Pestyjen neulasten pitoisuudet vaihtelivat 2.89-3.92 mg Ca/g ja 0.08-0.23 mg Cl/g välillä ja pesemättömien neulasten pitoisuudet vaihtelivat 3.08-3.69 mg Ca/g ja 0.08-0.22 mg Cl/g välillä.

4.3.3 Ulkoiset oireet

Sekä kontrolli- että suolattujen sorateiden varsilla koepuut olivat lähes kokonaan ilman oireita (taulukko 8).



Kuva 18. Pestyjen ja pesemättömien neulasten kalsiumpitoisuudet (mg/g kuiva-ainetta) suolatuilla ja kontrolliteillä heinäkuussa 1990.



Kuva 19. Pestyjen ja pesemättömien neulasten kloridipitoisuudet (mg/g kuiva-ainetta) suolatuilla ja kontrolliteillä heinäkuussa 1990.

Taulukko 8. Koepuiden ulkoisten oireiden luokittelu, kesäkuussa ja heinäkuussa 1990. (0=terve, 1=lievästi vaurioitunut, 2=selvästi vaurioitunut, 3=pahoin vaurioitunut, Mo=moodi=yleisin luokka)

OIRELUOKKA				
koeala	puu nro	kesäkuu	heinäkuu	muuta
MT 551 JA	1	0	0	männynneulaskoi
MT 549 YHD.	2	0	1	
(KONTROLI 1)	3	0	0	
	4	0	0	
	5	0 Mo=0	0 Mo=0	
VT 17 JA				
PT 16369 YHD.	1	1	2	
(KONTROLI 2)	2	0	0	
	3	0	0	
	4	1	1	
	5	0 Mo=0	0 Mo=0	
PT 16226	1	0	0	
(SUOLATTU 1)	2	1	1	
	3	1	1	
	4	0	1	
	5	0 Mo=0	0 Mo=1	
PT 16369	1	0	0	
(SUOLATTU 2)	2	0	0	
	3	0	0	
	4	0	0	
	5	0 Mo=0	0 Mo=0	

5 TULOSTEN TARKASTELU

Maanteiden talvisuolaus nosti selvästi tienvarrella kasvavien mäntyjen neulasten natrium- ja kloridipitoisuuksia verrattuna suolaamattomien teiden pitoisuuksiin. Alkupalvesta pitoisuuksien kohoaminen ei ollut kaikilla koealoilla tilastollisesti merkitsevää, mutta toukokuun näytteissä kaikilla suolatuilla teillä neulasten natrium- ja kloridipitoisuudet olivat kontrollialoja merkitsevästi suuremmat. Kevään kuluessa erityisesti natrium kerääntyi neulasiin; sen sijaan kloridipitoisuuksissa kohoava trendi ei ollut yhtä merkittävä. Tämä tukee hyvin kirjallisuudessa esitettyjä tietoja, joiden mukaan natrium on pysyvämpi ja kertyy kasviin kloridia helpommin (esim. Spotts ym. 1972).

Tässä selvityksessä analysoidut neulasten suolapitoisuudet olivat ulkomaisten tulosten tasoa (esim. Hofstra ja Hall 1971). Toisaalta ulkomailla suolattujen teiden varsilla pitoisuudet ovat olleet paikoin paljon suuremmat. Tämä saattaa osin selittyä suuremmilla liikenne- ja suolausmäärillä sekä poikkeavilla lajeilla. Paikoin mitatut pitoisuudet olivat niin korkeita, että kirjallisuuden mukaan havupuilla voi olettaa näkyviä oireita ilmaantuvan (Behm ja Kessler 1971).

Vaikka viitostiellä käytetyt suolamäärät olivat huomattavasti muita teitä suuremmat, eivät neulasten natrium- tai kloridipitoisuudet olleet merkitsevästi muita koealoja suurempia. Tämä saattaa aiheutua siitä, että tutkitut puut kasvoivat viitostien varrella kauempana tiestä kuin muilla koealoilla ja toisaalta puiden alimmat oksat olivat jo kuolleet, joten näyteneulaset kerättiin ylempää kuin muilla koealoilla. Näyteoksan korkeuden maasta on aiemmissa tutkimuksissa huomattu vaikuttavan neulasten suolapitoisuuksiin mm. siten, että 'roiskekorkeuden' yläpuolella pitoisuudet ovat olleet pienempiä kuin puun alaosassa (Hofstra ja Hall 1971).

Vaikka kirjallisuuden mukaan kalsiumkloridin yhtäaikainen käyttö natriumkloridin kanssa saattaisi vähentää natriumin ja kloridin sisäänottoa kasviin (Bogemans ym. 1989), ei sitä tässä selvityksessä pystytty osoittamaan. Syynä saattaa olla käytetyn kalsiumkloridimäärän vähäisyys suhteessa natriumkloridiin. Kuopion tiepiirin alueella kalsiumkloridin osuus oli ainoastaan 2 % kokonaissuolamäärästä kun Bogemansin ym. (1989) tutkimuksessa käytetty suhde oli 25/75. Toisaalta myös edellisessä kappaleessa mainitut näytteenottoon liittyvät tekijät saattavat vaikuttaa asiaan. Neulasten kalsiumpitoisuuksiin kalsiumkloridiliuoksen käyttö natriumkloridin kostutuksessa ei vaikuttanut. Myöskään Smith ym. (1970) eivät havainneet kohonneita kalsiumpitoisuuksia strobusemännin neulasissa samanlaisen suolaussysteemin jälkeen.

Neulasten natriumpitoisuudet kasvoivat suhteellisesti kloridipitoisuuksia enemmän. Samanlaisia tuloksia on saatu myös muissa tutkimuksissa (Lumis ym. 1976, Trockner ja Albert 1986a). Tämä aiheutunee siitä, että natrium pääsee pienemmän kokonsa ansiosta helpommin kasviin sisälle ja toisaalta on myös kloridia pysyvämpi ioni kasvin sisällä. Kloridin on kuitenkin todettu olevan ensisijainen vaurioiden aiheuttaja (esim. Holmes 1961, Rich 1972) ja natriumin edistävän kloridin aiheuttamia oireita (Spotts ym. 1972), joten suhteellisen pienetkin kloridipitoisuudet saattavat aiheuttaa kasveille vaurioita.

Etäisyyden vaikutusta selvitettäessä kävi ilmi, että kauempana tiestä (n. 15-20 m) neulasten natrium- ja kloridipitoisuudet laskivat lähes kontrollikoealojen tasolle. Tämä viittaa siihen, että tiesuolan vaikutukset ainakin tutkituilla teillä ovat varsin pienialaiset. Tiesuolan leviämiseen vaikuttavat tietysti myös mm. tien varren maan topografia, kasvillisuuden tiheys ja korkeus sekä liikennemäärien ja käytettyjen suolamäärien suuruus.

Neulasten natrium- ja kloridipitoisuuksiin ei tislattulla vedellä pesu vaikuttanut. Osaltaan tämä saattaa aiheutua pesun riittämät-

tömyydestä. Toisaalta mm. toukokuun näytteenottopäivänä oli edellisestä suolauskerrasta kulunut lähes kuukausi ja sateita oli ollut tällä välillä normaalia enemmän eli sade oli oletettavasti huuhtonut neulasten pinnalta edellisen suolauskerran jäännökset. Silti pitoisuudet olivat suurimmat toukokuun näytteissä, mikä viittaa siihen, että mitatut pitoisuudet edustavat todella neulasten sisällä olevia pitoisuuksia eikä pintakontaminaatiota.

Suolattujen teiden varsilla näkyviä oireita mäntyjen ensimmäisessä vuosikerrassa esiintyi koealoillamme varsin vähän. Kuitenkin etenkin esim. Karttulantien varrella puissa havaittiin kirjallisuudessa tiesuolan aiheuttamiksi mainittuja pronsssinruskeita neulasia (esim. Sucoff ym. 1975). Selvää korrelaatiota näkyvien vaurioiden ja neulasten natrium- tai kloridipitoisuuksien välillä ei kuitenkaan ollut. Toisen vuosikerran onkin todettu olevan herkempi suolan vaikutuksille (McCune ym. 1977) ja myös tämän tutkimuksen aikana havaittiin toisessa vuosikerrassa enemmän oireita. Jatkotutkimuksissa olisikin kiinnitettävä huomiota myös vanhempiin neulasiin sekä näkyvien oireiden että alkuainepitoisuuksien osalta, sillä suolapitoisuuden kohoaminen ja oireiden ilmaantuminen ovat riippuvaisia myös altistusajasta (Hall ym. 1972).

Neulasten kalvonvuotoa kuvaava suure, kaliumvuoto, poikkesi kontrollikoealan tuloksista tilastollisesti merkitsevästi ainoastaan helmikuun mittauksissa. Tämä sopii hyvin yleiseen talvistressiteoriaan, jonka mukaan Suomessa erityisesti talviolosuhteet toimivat laukaisevana tekijänä vaurioiden synnylle. Toisaalta myös akuutit suolaustilanteet tapahtuvat juuri alkutalvesta. Helmikuusta lähtien kevättalvi oli poikkeuksellisen lämmin, joka mitä ilmeisemmin vähensi oireiden määrää 'normaalitalveen' verrattuna. Huomattavaa on lisäksi se, että erot olivat merkitseviä ainoastaan verrattuna Puutossalmen koealaan, missä suolauksen määrä oli n. sadasosa toiseen kontrollialaan verrattuna. Tämä viittaa siihen,

että pienikin suolamäärä saattaa aiheuttaa kalvovaurioita (eli tässä tapauksessa lisääntyntä kaliumvuotoa soluista).

Johtokykymittauksen tulokset, jotka myös kuvastavat mm. neulasten kalvovaurioiden määrää, eivät poikenneet suolattujen ja kontrolliteiden välillä. Helmikuussa Karttulan (suolatun) tien gradienttipisteessä eli kauempana tiestä kasvavissa männyissä pesemättömien neulasten johtokykyarvo oli merkitsevästi tien vieren arvoja pienempi. Tämä aiheutunee suurelta osin tien vierellä olevien neulasten suuremmasta pintakontaminaation määrästä. Samaten kontrollialoilla kevään kuluessa tapahtunut johtokykyarvojen suureneminen on selitettävissä pintakontaminaation määrän kasvulla neulasten ikääntyessä.

Johtokykymittaukset tehtiin sekä pestyistä että pesemättömistä neulasista. Tulosten välillä ei ollut kuitenkaan merkittäviä eroja. Tislatulla vedellä pesu saattoi kuitenkin olla riittämätön poistamaan täydellisesti pinnalla olevia epäpuhtauksia, jolloin tulosten hajonta tuli suureksi ja tilastollisesti merkitseviä eroja ei saatu esille kontrollialojen ja suolattujen teiden välille.

Pölynäidontasuolauksessa kesäaikaan käytetyllä kalsiumkloridilla ei ollut vaikutusta sorateiden varsien mäntyihin. Kalsium- ja kloridipitoisuuksissa ei ollut merkitseviä eroja suolattujen ja suolaamattomien teiden välillä eikä ulkoisia oireita esiintynyt. Kloridipitoisuuksissa oli kuitenkin selvä kohoava trendi suolattujen teiden varsilla. Toisaalta kloridi ei ole kovin pysyvä kasvissa, joten mahdollinen haittavaikutusaika jää lyhyeksi. Kaliumvuoto- ja johtokykytuloksissa ei myöskään ollut eroja suolattujen ja suolaamattomien sorateiden välillä.

Vaikka kirjallisuuden mukaan ilman kautta tuleva laskeuma on kasvien suolan saannin kannalta merkittävämpi kuin maaperästä

tuleva suola (esim. Hofstra ja Hall 1971, Simini ja Leone 1986a) olisi jatkossa myös maaperän suolapitoisuudet yhdistettävä kasvivauriotutkimuksiin. Koska tiesuolan käytöllä on myös havaittu kasvua vähentäviä vaikutuksia (esim. Fleck ym. 1987) olisi perusteltua tehdä myös kasvumittauksia arvioitaessa tiesuolan vaikutuksia kasvillisuuteen Suomessa.

6 YHTEENVETO

Maanteiden talvisuolaus nosti selvästi tienvarrella kasvavien mäntyjen neulasten natrium- ja kloridipitoisuuksia. Toukokuussa kaikkien suolattujen teiden näytteissä pitoisuudet olivat tilastollisesti merkitsevästi kontrollikoealoja korkeammat. Kalsiumkloridiliuoksen käyttö natriumkloridin kostutuksessa talvisuolauksen yhteydessä ei nostanut neulasten kalsiumpitoisuuksia eikä myöskään alentanut neulasten natrium- tai kloridipitoisuuksia verrattuna pelkkään natriumkloridikäsittelyyn.

Mitatut natrium- ja kloridipitoisuudet olivat ulkomaisten tulosten tasoa. Paikoin pitoisuudet olivat suolattujen teiden varsilla niin korkeita, että näkyviä oireita havupuilla voi olettaa kirjallisuuden perusteella syntyvän. Kauempana tiestä (n. 15-20 m) pitoisuudet laskivat lähes kontrollialojen tasolle. Tämä viittaa siihen, että ainakin tutkituilla teillä tiesuolan kasvillisuusvaikutukset ovat suhteellisen pienialaiset.

Suolattujen teiden varsilla havaittiin paikoin pronssinruskeita neulasia, mikä oire on useissa aiemmissa tutkimuksissa havaittu tiesuolan käytön yhteydessä.

Neulasten kalvovaurioiden laajuutta kuvastava kaliumvuodon määrä kohosi merkitsevästi ainoastaan helmikuun mittauksissa. Tämä tukee yleistä talvistressiteoriaa, jonka mukaan Suomessa erityisesti talviolosuhteet toimivat laukaisevana tekijänä vaurioiden synnylle.

Toisaalta kevättalvi oli poikkeuksellisen lämmin, joten näkyvien vaurioiden määrä jäi vähäiseksi.

Kesäsuolauksella ei todettu olevan mitään merkitseviä vaikutuksia tutkittujen sorateiden varrella kasvaviin mäntyihin. Ainoastaan kloridipitoisuuksissa oli selvä kohoava trendi suolattujen teiden varrella.

Tämän selvityksen perusteella on selvästi osoitettu liukkaudentorjunnassa käytetyn maantiesuolan aiheuttavan vahingollisia vaikutuksia tienvarren kasvillisuuteen. Tästä syystä olisi perusteltua vähentää suolan käyttöä esimerkiksi kehittämällä levitystekniikkaa ja tutkimalla myös muiden, kasvillisuudelle vähemmän haitallisten liukkaudentorjunta-aineiden käyttöä.

LÄHTEET

- Banasova, V., 1985. The influence of deicing salts on the soil and plants along a highway. *Ekologia CSSR*, 3: 315-328.
- Barrick, W.E, Flore, J.A. and Davidson H., 1979. Deicing salt salt spray injury in selected Pinus spp. *J. Am. Hortic Sci.*, 104: 617-622.
- Bedunah, D. ja Trlica, M.J., 1981. Carbon dioxide exchange of ponderosa pine as affected by sodium chloride and polyethylene glycol. *Forest Science*, 27:139.
- Behm, R. und Kessler, W., 1971. Schäden an Fichten und Kiefern infolge der Winterbehandlung von Strassen mit Chloridlösung. *Nachrichtenblatt Pflanzenschutzdienst, DDR*, 25: 211-216.
- Blumental-Goldschmidt, S., Poljakoff-Mayber, A., 1968. Effect of substrate salinity on growth and on submicroscopic structure of leaf cells of Atriplex halimus L.. *Aust. J. Bot.*, 16: 469-478.
- Bogemans, J., Neirinckx, L. and Stassart, J.M., 1989. Effect of deicing chloride salts on ion accumulation in spruce Picea Abies L.. *Plant and Soil*, 113: 3-11.
- Braun, S. and Flückiger, W., 1984. Increased population of the aphid Aphis pomi at a motorway. Part 2. The effect of drought and deicing salt. *Environ. Pollut. Ser. A Ecol. Biol.*, 36: 261-270.
- Breckle, S.W., Schüre, B., 1985. Natriumionen im Holz streusalz-belasteter Bäume. *Verh. Ges. Oekol.* 13: 665-670.
- Bucovac, M.J., Wittwer, S.H., 1957. Absorption and mobility of foliar applied nutrients. *Plant. Physiol.* 32: 428-435.
- Curtailing usage of de-icing agents in winter maintenance. Road transport research. OECD, Pariisi, 1989, 124 s.
- Constantini A., Rich, A.E. 1973. Comparison of salt injury to four species of coniferous tree seedlings when salt was applied to the potting medium and to the needles with or without an anti-transpirant. *Phytopath.* 63:200.
- Davidson, H., 1970. Pine mortality along Michigan highways. *Hortic Sci.*, 5: 12-13.
- Derome, J., Pätilä, A., 1990. Alleviation of forest soil acidification through liming s. 1093-1115 kirjassa Kauppi, P., Anttila P., Kenttämies, K.: Acidification in Finland. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1990.

Dexter, S.T., Tottingham, W.E., Garber, L.F., 1930. Preliminary results in measuring the hardness of plants. *Plant Physiol.* 5: 215-223.

Dexter, S.T., Tottingham, W.E., Garber, L.F., 1932. Investigations of the hardness of plants by measurements of electrical conductivity. *Plant Physiol.* 7: 63-78.

Dimitri, L., Brod, H.G., 1982. Einfluss der Auftausalze auf Bäume und andere Pflanzen. *Landsch. Stadt.* 14: 73-84.

Dust suppressant study. Acres International Limited, Ontario, 1988, 94 s. + liitteet.

Ehlig, C.F., 1964. Salt tolerance of raspberry, boysenberry and blackberry. *Am. Soc. Hort. Sci.* 85: 318-324.

Elkiey, T., Ormrod, D., P., 1979. Ozone and/or sulphur dioxide effects on tissue permeability of petunia leaves. *Atm. Env.* 13: 1165-1168.

Ernst, W., Feldermann, D., 1975. Auswirkungen der Wintersalzstreuung auf den Mineralstoffhaushalt von Linden. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 6: 629-640.

Fleck, A.M., Lacki, M.J., Sutherland, J., 1988. Response by white birch *Betula papyrifera* to road salt applications at Cascade Lakes, New York. *J. Environ. Manage.* 27: 369-377.

Flowers, T.J., 1973. Salt tolerance in *Suaeda maritima* (L.) Dum. *J. Exp. Bot.* 25: 101-110.

Gabriels, R., 1978. The effect of irrigation water quality on the growing medium. *Acta Hort.* 82: 201-212.

Greub, L.J., Drolsom, P.N., Rohweder, D.A., 1985. Salt tolerance of grasses and legumes for roadside use. *Agron. J.*, 77: 76-80.

Guttay, A.J. R., 1976. Impact of deicing salt upon the endomycorrhizae of roadside sugar maples. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 952-954. ref. Herrick, 1988.

Hall, R., Hofstra, G., Lumis, G.P., 1972. Effects of de-icing salt on eastern White pine: foliar injury, growth suppression and seasonal changes in foliar concentration of sodium and chloride. *Can. J. For. Res.*, 2: 244-249.

Hall, R., Hofstra, G., Lumis, G.P., 1973. Leaf necrosis of roadside sugar maple in Ontario in relation to elemental composition of soil and leaves. *Phytopath.*, 63: 1426-1427.

- Herrick, G.T., 1988. Relationships between soil salinity, sap-sugar concentration and health of declining roadside sugar maples (Acer saccharum). Ohio J. Sci., (5): 192-194.
- Hofstra, G., Hall, R., 1971. Injury on roadside trees: leaf injury on pine and white cedar in relation to foliar levels of sodium chloride. Can. J. Bot., 49: 613-622.
- Hofstra, G., Lumis, G.P., 1975. Levels of deicing salt producing injury on apple trees. Can. J. Plant Sci., 55: 113-115.
- Hofstra, G., Smith, D.W., 1984. The effects of road deicing salt on the levels of ions in roadside soil in southern Ontario. J. Environ. Manage., 19: 261-271.
- Holmes, F.W., 1961. Salt injury to trees. Phytopath., 51: 712-718.
- Holmes, F.W., Baker, J.H. 1966. Salt injury to trees. II. Sodium and chloride in roadside sugar maples in Massachusetts. Phytopath., 56: 633-636.
- Hutchinson, F. E., Olson, B. E., 1967. Relationship of road salt application to sodium and chloride ion levels in the soil bordering major highways. Highw. Res. Rec. 54: 1071-1075.
- Höster, H.R., 1977. Veränderungen der Holzstruktur als Indikator für Umweltbelastungen bei Bäumen. Ber. Deutsch. Bot. Ges. Bd. 90: 253-260.
- Kammerbauer, H., Ziegler-Jöns, A., Römmelt, R., Knoppik, D., Hock, B., 1987. Exposure of Norway spruce at the highway border: Effects on gas exchange and growth. Experientia 43: 1124-1125.
- Lacasse, N.L., Rich, A.E., 1964. Maple decline in New Hampshire. Phytopath. 54: 1071-1075.
- Leh, H-O., 1973. Untersuchungen über die Auswirkungen der Anwendung von Natriumchlorid als Auftaumittel auf die Strassenbäume in Berlin. Nachrichtenbl. Deutsch. Pflanzenschutzd. 25: 163-170.
- Liem, A. S.N., Hendricks, A., Kraal, H. and Loenen, M., 1985. Effects of deicing salt on roadside grasses and herbs. Plant and Soil, 84: 299-310.
- Lumis, G.P., Hofstra, G., Hall, R., 1973. Sensitivity of roadside trees and shrubs to aerial drift of deicing salt. Hort. Sci., 8: 475-477.
- Lumis, G.P., Hofstra, G., Hall, R., 1976. Roadside woody plant susceptibility to sodium and chloride accumulation during winter and spring. Can J. Plant Sci., 56: 853-859.

- McCune, D.C., Silberman, D.H., Mandl, R.H., Weinstein, L.H., Freudenthal, P.C., Glardina, P.A. 1977. Studies on the effects of saline aerosols of cooling tower origin on plants. J. Air Poll. Cont. Ass. 27: 319-324.
- Mekdaschi, R., Horlacher, D., Schulz, R. and Marschner, H., 1988. De-icing salt injury and amelioration of roadside trees in Stuttgart. Angew. Bot., 62: 355-371.
- Menlove, H.O., 1973. NaCl contamination in pine trees determined by neutron activation techniques. Water, Air, and Soil Pollution, 2 (1):119-123.
- Müller, M., Santarius, K.A., 1978. Changes in chloroplast membrane lipids during adaptation of barley to extreme salinity. Plant Physiol. 62: 326-329.
- Northover, J., 1987. Sodium chloride injury to dormant roadside peach trees and its effect on the incidence of infections by Leucostoma spp. Phytopath., 77: 835-840.
- Pasternak, D., Twersky, M., De Malach, Y.. Salt resistance in agricultural crops. s. 128-142. kirjassa Mussell, H., Staples, R.C.. Stress physiology in crop plants. John Wiley and Sons. Inc., 1979, 510 s.
- Priebe, A., Jäger, H.-J., 1978. Einfluss von NaCl auf die freien Aminosäuren von Pflanzen unterschiedlicher Salztoleranz. Phytol 19: 113-122.
- Priebe, L.V., 1990. Deicing salt compatibility with vegetation. Public works 48-49.
- Prinzing, A., 1987. Erfassung und Beurteilung der Schäden an Strassengehölzen in Stuttgart. Jh. Ges. Naturkde. Württ. 142: 127-141.
- Prior, G. A., Berthoeux, P. M., 1967. A study of salt pollution of soil by highway salting. Highw. Res. Rec. 193: 8-21.
- Puckett, K.J., Tomassini, F.D., Nieboer, E., Richardson, D.H.S., 1977. Potassium efflux by lichen Thalli following exposure to aqueous sulphur dioxide. New. Phytol. 79: 135-145.
- Pukacki, P, Pukacka, S., 1987: Freezing stress and membrane injury of Norway spruce (Picea abies) tissues. Physiol. Plant. 69: 156-160.
- Pyykkö, M., 1977. Effects of salt spray on growth and development of Pinus sylvestris L. Ann. Bot. Fennici 14: 49-61.

Rich, A.E., 1972. Effects of salt on eastern highway trees. Amer. Nurseryman, 135: 36-39.

Roberts, E.C., Zybur, E.L., 1967. Effect of sodium chloride on grasses for roadside use. Highw. Res. Rec. 193: 35-42.

Rössler, G., Schweitzer, B. and Arndt, U., 1986. Effects of pollution from road salt on roadside trees. Verh. Ges. Oekol. 14: 351-355.

Sauer, G., 1967. Über Schäden an der Bepflanzung der Bundesfernstrassen durch Auftausalze. Nachrichtenbl. Deutsch. Pflanzenschutzd. 19: 81-87.

Sauter, J.J., Kammerbauer, H., Pambor, L., Hock, B., 1987. Evidence for the accelerated micromorphological degradation of epistomatal waxes in Norway spruce by motor vehicle emissions. Eur. J. For. Path. 17: 444-448.

Sauter, J.J., Pambor, L., 1989. The dramatic corrosive effect of road side exposure on the epistomatal wax crystalloids on spruce and fir - and its significance for the 'Waldsterben'. Eur. J. For. Path. 19: 370-378.

Scott, N. E., Davison, A.W., 1985. The distribution and ecology of coastal species on roadsides. Vegetatio, 62: 433-440.

Shortle, W.C., Rich, A.E., 1970. Relative sodium chloride tolerance of common roadside trees in southeastern New Hampshire. Plant Dis. Reporter, 54: 360-362.

Simini, M., Leone, I.A., 1986a. Studies on the effects of deicing salts on roadside trees. Arboric. J., 10 (3):221-231.

Simini, M., Leone, I.A., 1986b. The role of alkanes in epicuticular wax relative to tolerance of pine species to saline spray. Forest Sci. 32: 487-492.

Smith, W.H., 1970. Salt contamination of white pine planted adjacent to an interstate highway. Plant Dis. Rep., 54: 1021-1025.

Spirig, A., 1981. Zum Wasserhaushalt verschiedener Strassenbaumarten unter Einfluss der Winterlichen Streusalzanwendung. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel in Zürich, 74, 60 s. ref. Banasova, 1985.

Spotts, R.A., Altman, J., Staley, J.M., 1972. Soil salinity related to ponderosa pine tipburn. Phytopath., 62: 705-708. Sucoff, E., Feller, R., Kanton D., 1975. Deicing salt (sodium chloride) damage to Pinus ponderosa Ait.. Can. J. Bot., 58: 546-556.

Tiesuolan (NaCl) esiintyminen moottoritien lähialueen maaperässä sekä pinta- ja pohjavesissä. Uudenmaan tie ja vesiraakennuspiiri, Kunnossapito, Helsinki, 1973, 35 s.

Townsend, A.M., Kwolek, W.F., 1987. Relative susceptibility of thirteen pine species to sodium chloride spray. J. Arboric., 13: 225-228.

Trockner, V., Albert, R., 1986a. Ion distribution and pattern of chemical constituents in leaves of salt affected roadside trees in Vienna Austria I. Ionic equilibrium. Flora. Jena, 178: 369-390.

Trockner, V., Albert, R., 1986b. Ion distribution and pattern of chemical constituents in leaves of salt affected roadside trees in Vienna Austria II. Nitrogen and soluble carbohydrates. Flora. Jena, 178: 391-408.

TVH/Tierekisteri, 1989.

Walton, G.S., 1969. Phytotoxicity of NaCl and CaCl₂ to Norway maples. Phytopath., 59: 1412-1415.

Wester, H.V., Cohen, E.E. 1968. Salt damage to vegetation in the Washington, D.C area during the 1966-67 winter. Plant Dis. Rep. 52: 350-354.

Westing, A.H., 1969. Plants and salt in the roadside environment. Phytopath., 59: 1174-1181.

Wignarajah, K., Jennings, D.H., Handley, J.F. 1975. The effect of salinity on growth of Phaseolus vulgaris L. 1. Anatomical changes in the first trifoliate leaf. Ann. Bot. 39: 1029-1038.

Wilcox, D.A., 1985. The effects of deicing salts on vegetation in Pinhook Bog, Indiana. Can. J. Bot. 64: 865-874.

Wilcox, D.A., Andrus, R.E., 1987. The role of Sphagnum fimbriatum in secondary succession in a road salt impacted bog. Can. J. Bot. 65: 2270-2275.

Wytttenbach, A., Tobler, L., 1988. The seasonal variation of 20 elements in 1st and 2nd year needles of Norway spruce, Picea abies (L.) Karst. Trees 2: 52-64.

Wytttenbach, A., Tobler, L., Bajo, S. 1988. Na, Cl and Br in needles of Norway spruce (P. abies) and in the aerosol adhering to the needles. Toxicol. Environ. Chem. 19: 25-33.

Zolg, M., Bornkamm, R., 1983. Über die Auswirkung von Streusalz auf einige Blatinhaltsstoffe verschiedener Strassenbaumarten. Flora 174: 285-302.

Zulauf, R., 1966. Pflanzen scäden durch Streusalzanwendung in Winterdienst. Strasse und Verkehr, 52: 519-526.

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1990 Liikenneonnettomuuksien aikasarjaennuste vuodelle 1990. 18 s.
TIEL 741863
- 2/1990 Liuskapystyjojakenttien toiminnasta. 64 s. + liitteet, TIEL 703344
- 3/1990 Tiepenkereen holvautuminen : teoreettinen osa. 46 s. + liitteet,
TIEL 703343
- 4/1990 Bitumistabilointi : käytännön ohjeita, mitoitus. 25 s. + liitteet,
TIEL 703899
- 5/1990 Sorateiden ylläpidon ohjaus : stokastisen mallin soveltamisesta sora-
teiden kunnonmittauksiin ja toimenpidesuunnitteluun.
77 s. + 38 liitettä
- 6/1990 Rengasmelu ja päällysteet. 24 s. + 32 liitettä, TIEL 703616
- 7/1990 Talvihoidon laadunseurantajärjestelmän kehittäminen. 20 s. + liitteet,
TIEL 703985
- 8/1990 Tiehankkeiden hyvinvointivaikutusten arviointi. 19 s.
TIEL 703618
- 9/1990 Tienkäyttäjän informoinnin kehittämismahdollisuuksien tarkastelu. 39 s.
TIEL 703987
- 10/1990 Tunneliteiden liikenneteknisen mitoituksen perusteita. 82 s. + liitteet,
TIEL 703620
- 1/1991 Satelliitteihin perustuvasta paikannusjärjestelmästä. 18 s.
TIEL 703780
- 2/1991 Autokanta ja liikenne OECD-maissa. TIEL 3200002
- 3/1991 Tiesalajien toimivuus ja kunnossapito. TIEL 3200003
- 4/1991 Suolauksen vaikutukset tienvarsikasvillisuuteen. TIEL 3200004